

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

Elektrická část elektráren  
Electrical part of power stations

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra elektroenergetiky

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Fulneček**

Studijní program: B2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika

Téma: Elektrická část elektráren  
Electrical Part of Power Stations

Zásady pro vypracování:

V bakalářské práci zpracujte následující problematiku:

- o Druhy elektráren.
- o Technologické členění elektráren.
- o Elektrická část elektráren
- o Současné trendy.
- o Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


- o Kolcun, M. a kol.: Elektrárny, TU Košice, 2006
- o Brauner J., Šindler Z.: Elektrická část elektráren, VŠB Ostrava 1987
- o Dočekal A., Bouček S.: Elektrárny II, ČVUT Praha 1995
- o Barabas K.: Jaderné elektrárny, ČVUT v Praze, 1985
- o Další podle pokynů vedoucího práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Radomír Goňo, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

  
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



  
prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou/diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 4.5.2012

F. Macek

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Radomíru Goňo, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce a zejména za cenné rady a připomínky, které mi poskytl.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce popisuje problematiku elektráren, zejména jejich elektrické části. Jsou zde popsány základní principy funkce různých druhů elektráren, možnosti provozu, jednotlivá technologická zařízení a jejich vliv na chod a celkovou účinnost elektrárny. Podrobně jsou popsány jednotlivé prvky elektrické části elektráren, možné způsoby jejich provozu a zapojení. Jsou zde také popsány možnosti realizace a zapojení ochrany jednotlivých prvků elektrické části a také možné způsoby pokrytí vlastní spotřeby elektrárny. Poslední část práce popisuje některé ze současných trendů.

## **Abstract**

This thesis describes the problem of power stations, especially their electrical parts. It describes the basic operational principles of different types of power stations, the possibility of operation, individual technological devices and their effect on the operation and overall efficiency of power stations. There are described in detail the individual elements of the electric part, possible ways of their operation and connection. There are also discussed the possibilities of protection individual elements of electrical parts and possible ways of covering power station own consumption. The last part describes some of the current trends.

## **Klíčová slova**

elektrárna, alternátor, transformátor, jaderný reaktor, parogenerátor, turbína

## **Key words**

power station, alternator, transformer, nuclear reactor, steam generator, turbine

## Seznam použitých zkratk

AT – autotransformátor  
G – generátor  
I> - nadproudový článek  
 $I_{k0}$  – statorový proud nakrátko [kA]  
 $I_k$  – jmenovitý statorový proud [kA]  
K – kotel  
KČ – kondenzační čerpadlo  
KO – kondenzátor  
NČ – napájecí čerpadlo  
NN – napájecí nádrž  
NT – nízkotlaká turbína  
NTO – nízkotlaký ohřívák  
PTN – měřicí transformátor napětí  
PTP – měřicí transformátor proudu  
R – regulátor  
RS – redukční stanice  
T – turbína  
TK – kondenzační turbína  
TP – protitlaká turbína  
U< - podpět'ový článek  
VT – vysokotlaká turbína  
VTO – vysokotlaký ohřívák  
f – frekvence  
 $n_s$  – synchronní otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]  
p – počet pólových dvojic  
v – zkratový poměr

## **Obsah**

Úvod .....	1
1. Druhy elektráren .....	2
1.1 Parní elektrárny .....	2
1.2 Jaderné elektrárny .....	4
1.3 Elektrárny se spalovacími turbínami .....	6
1.4 Vodní elektrárny .....	7
1.5 Fotovoltaické elektrárny .....	8
1.6 Větrné elektrárny .....	9
1.7 Další typy elektráren .....	11
2. Technologické členění elektráren .....	12
2.1 Parní elektrárny .....	12
2.2 Jaderné elektrárny .....	15
3. Elektrická část elektráren .....	19
3.1 Alternátory .....	19
3.2 Transformátory .....	31
3.3 Vlastní spotřeba elektrárny .....	34
4. Současné trendy .....	35
4.1 Parní a jaderné elektrárny .....	35
4.2 Větrné elektrárny .....	37
4.3 Fotovoltaické elektrárny .....	38
Závěr .....	39
Použitá literatura .....	40

## Úvod

Tento text poskytuje ucelený pohled na problematiku elektráren, zejména jejich elektrické části.

První kapitola obsahuje popis jednotlivých druhů elektráren a objasňuje principy jejich funkce. Popisuje jejich výhody a nevýhody a nastiňuje problematiku jejich provozu a úlohu v elektrizační síti.

Druhá kapitola se zbývá jednotlivými technologickými zařízeními, která jsou potřebná pro chod elektrárny. Uvádí jejich možné konfigurace a také vliv na účinnost elektrárny jako takové. Rovněž jsou zde popsány technologie zmírňující dopad vlivu provozu jednotlivých druhů elektráren na životní prostředí.

Třetí kapitola popisuje elektrickou část elektráren. První podkapitola se věnuje alternátorům – zejména jejich konstrukci, parametrům, používaným ochranám a vlastnímu provozu alternátoru. Druhá podkapitola se zabývá transformátory a jejich ochranami. V třetí podkapitole jsou popsány možnosti zajištění vlastní spotřeby elektráren.

Poslední kapitola popisuje některé ze současných trendů v elektrických částech elektráren.

# 1. Druhy elektráren

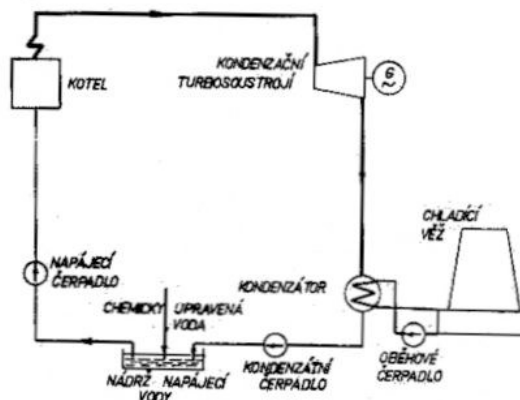
Na území ČR jsou v provozu různé typy elektráren. Z hlediska instalovaného výkonu jsou dominantní elektrárny parní. Ty nejsou investičně příliš náročné a jejich technologie jsou dobře zvládnuté, jelikož se z historického hlediska jedná o jeden z nejstarších druhů elektráren. Dalším významným a také asi nejkontroverznějším zdrojem jsou elektrárny jaderné. Byť jsou investičně velmi nákladné, dokážou produkovat elektrickou energii za velmi nízkou cenu. Vodní elektrárny tvoří velice důležitý prvek při regulaci elektrizační sítě. I když jejich instalovaný výkon není velký (a patrně se již příliš zvětšovat nebude, jelikož na našem území chybí vhodné lokality), jsou svým rychlým nájездem a snadnou regulací nepostradatelné při pokrývání špiček. Obdobnou funkci plní elektrárny paroplynové, které mají také rychlý nájезд a jsou relativně snadno regulovatelné. Naproti tomu elektrárny fotovoltaické a větrné jsou zcela závislé na rozmarech počasí a uvažuje se o nich pouze jako o zdrojích doplňkových.

## **1.1 Parní elektrárny**

### **Elektrárny s kondenzační turbínou**

Kondenzační elektrárny jsou určeny pouze k výrobě elektrické energie (i když je možná dodávka páry, a to přímo z kotelny přes redukční stanici[1]). Pára vstupuje do kondenzační turbíny, kde expanduje. Na výstupu turbíny je tlak páry téměř nulový. K výstupu turbíny je připojen kondenzátor, kde pára kondenzuje na vodu. Tato voda je poté čerpadlem vháněna do nádrže napájecí vody, ze které je znovu čerpána do kotle.

Účinnost bude tím vyšší, čím vyšší bude tlak a teplota vstupní páry a čím nižší bude teplota a tlak na výstupu turbíny. Tato účinnost je v praxi 36-40%[5].



Obr. 1.1: Blokové schéma kondenzační elektrárny[1]

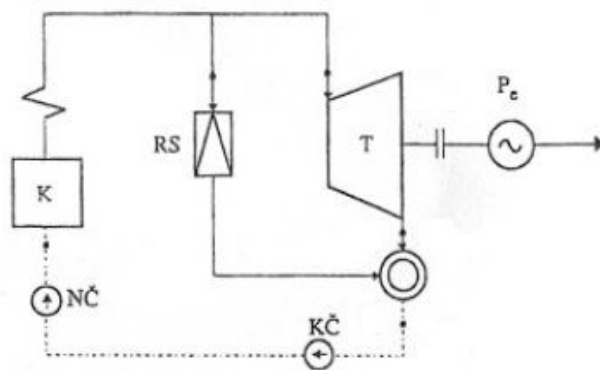
### **Kondenzátor**

Kondenzátor odebírá médium kondenzační (výparné) teplo. Pro parní turbíny užíváme kondenzátory povrchové. Uvnitř kondenzátoru je trubkový chladič, jímž protéká chladící médium. Pára, která vstupuje do horní části, kondenzuje v mezitrubkovém prostoru a je odváděna čerpadlem [5]. Kondenzátor je chlazen buďto průtočně (voda se přivádí z vodního zdroje a ohřátá se do něj vrací – časté u elektráren umístěných na pobřeží), nebo cirkuluje přes chladicí věž a z vodního zdroje se doplňují pouze její ztráty. [1]. Je také možno jej částečně chladit napájecí vodou, čímž zvýšíme účinnost termického cyklu. Ke kondenzátoru může být připojena vývěva, která zvyšuje tlakový spád turbíny – zvýšením hodnoty vakua snížíme spotřebu páry. Hodnota vakua závisí na chladícím povrchu kondenzátoru a také na teplotě a množství chladící vody. V kondenzátoru dochází k částečnému odplynění napájecí vody [2].



### Elektrárny s protitlakou turbínou

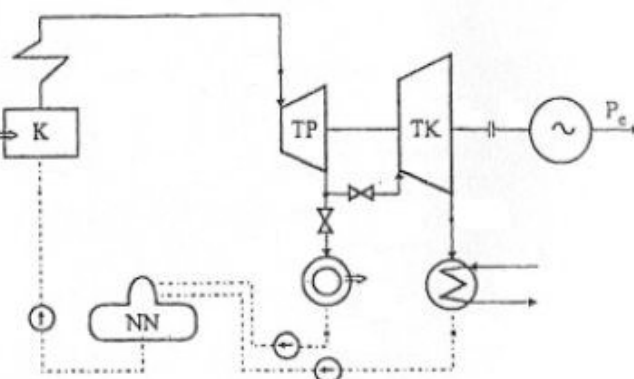
Tyto elektrárny slouží ke kombinované výrobě tepla a elektrické energie. Pára expanduje v turbíně na konstantní tlak, který odpovídá požadavkům spotřebiče tepla. Z výstupu turbíny je pak pára vedena k místu spotřeby, kde odevzdá své výparné teplo a kondenzuje. Vzniklým kondenzátem můžeme znovu napájet kotel (K). Účinnost přeměny tepla na mechanickou energii je nižší než u kondenzačních turbín, využijeme však větší část tepla, takže celková účinnost vzroste. Pomocí redukční stanice (RS) můžeme měnit množství dodaného tepla nezávisle na okamžitém výkonu turbíny (T)[2]. Elektrický výkon závisí na množství odebrané páry, proto se tyto turbíny instalují v provozech s dlouhodobým stálým odběrem páry[1].



Obr. 1.2: Blokové schéma elektrárny s protitlakou turbínou[2]

### Elektrárny s odběrovou turbínou

Tyto elektrárny slouží pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie. Využívají kombinace protitlakého a kondenzačního oběhu. Pára nejdříve vstupuje do protitlaké části turbíny (TP), kde se část její energie využije na výrobu elektrické energie. Z protitlaké části jde pára do odběru (regenerační ohřev, ohřívák horké vody, turbonapaječka apod.), kde předá část tepla, nebo do kondenzační části, kde se zbylá část tepla využije k výrobě elektrické energie [2]. Je možné realizovat čistě kondenzační provoz, pokud vyřadíme z oběhu odběr páry a máme dostatečně dimenzovaný kondenzátor. Čistě protitlaký provoz možný není, jelikož je nutný minimální průtok páry kondenzační částí k zamezení jejího přehřátí [1].

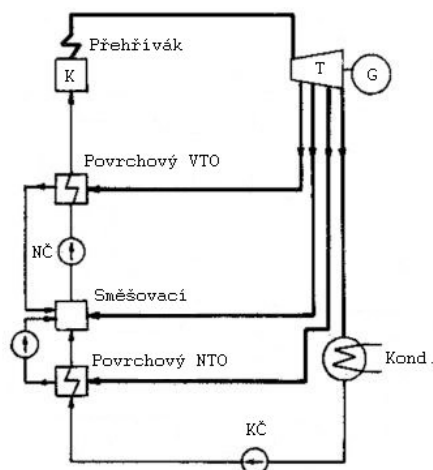


Obr. 1.3: Blokové schéma elektrárny s odběrovou turbínou[2]

### Regenerační ohřev napájecí vody

Z Rankin – Clausiova oběhu vyplývá, že nejnižší účinnost v tepelném oběhu má ohřev vody. Proto je výhodné ohřívat část vody mimo parogenerátor ve výměníku, ohříváném odběrovou párou.

Pára z odběru turbíny vstupuje do výměníku, kde kondenzuje a předá své teplo napájecí vodě. Množství páry, protékající jednotlivými stupni turbíny, se tak postupně zmenšuje. Význam tohoto ohřevu se zvyšuje s rostoucími parametry páry kotle[1]. Tepelná účinnost se zvyšuje s rostoucím počtem ohříváků, ovšem vzhledem k investičním nákladům jich nebývá více než osm. Každý další instalovaný ohřívák totiž způsobuje menší nárůst účinnosti, než předchodí [2]. Existuje několik typů regeneračního ohřevu - v praxi se nejčastěji využívá kombinace několika povrchových ohříváků s jedním směšovacím, který plní funkci odplyňováku [2].



Obr. 1.4: Regenerační ohřev [1]

## 1.2 Jaderné elektrárny

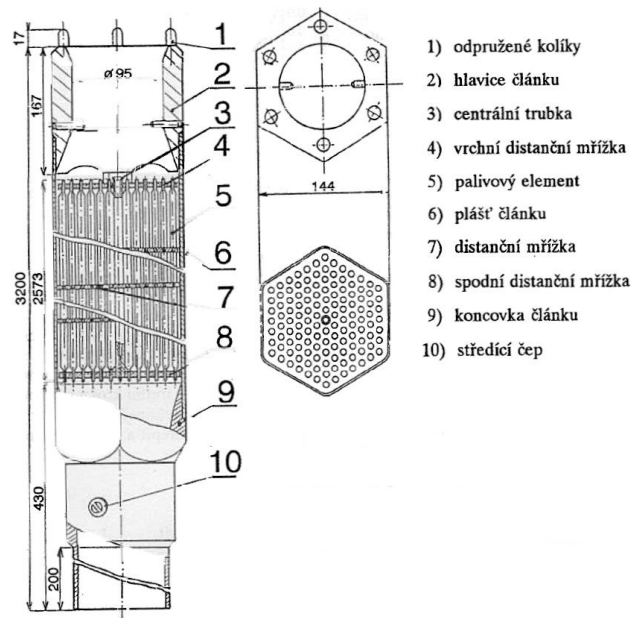
Podstatou své funkce jsou podobné elektrárnám parním. energii ovšem nezískávají spalováním paliva, ale štěpením atomů těžkých prvků v aktivní zóně reaktoru pomocí řízené řetězové reakce. Tento proces má na rozdíl od spalování fosilních paliv tu výhodu, že při něm nevznikají žádné exhalace. Také množství spotřebovaného paliva je oproti parním elektrárnám zanedbatelné, čímž odpadá problémy s jeho dopravou a skladováním. Podstatnou nevýhodou ovšem je, že při štěpení vzniká nebezpečné ionizující záření, které je nutné odstínit. Jaderná elektrárna je také významným zdrojem jaderného odpadu, který je pro člověka nebezpečný a jehož skladování a zpracování je problematické. V minulosti už došlo k haváriím reaktorů s významným únikem radioaktivity do okolí, proto jsou na tyto elektrárny kladeny mimořádné bezpečnostní nároky.

Účinnost jaderné elektrárny je nižší než u elektráren tepelných. Mají totiž vyšší vlastní spotřebu (až 15%), navíc většinou pracují se sytou párou, takže je nutné ji průběžně přehřívát a separovat [1]. Přehřívání páry je sice technicky možné (pomocí speciálních kanálů v reaktoru), v praxi se ale většinou nerealizuje, jelikož komplikuje konstrukci reaktoru [3].

### Jaderná paliva

Jako paliva v jaderných reaktorech lze využít izotopy uranu ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ ) a plutonia ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ). Plutonium se v přírodě téměř nevyskytuje, uran se vyskytuje v některých rudách. Přírodní uran se vylouhuje z uranové rudy a dále zpracovává na tzv. žlutý koláč. Koncentrace izotopu  $^{235}\text{U}$  v koláči je ale velmi malá a pro potřebu většiny reaktorů (s výjimkou některých typů) je třeba jej dále obohatit. To lze realizovat několika způsoby. Nejčastěji se tak děje ve speciálních odstředivkách, které využívají rozdílných fyzikálních vlastností izotopů. Do odstředivky je vhnán separovaný plyn. Lehčí (obohacená) část se odebírá ze středu odstředivky, těžší (neobohacená) část je odstředivou silou vytlačena na stěny válce [3]. Odstředivky jsou zapojeny do kaskády.

V reaktoru je palivo nejčastěji v keramické formě  $UO_2$ , méně často v kovové podobě. Jednotlivé elementy jsou hermeticky uzavřeny v palivové tyči, soustava tyčí tvoří palivový článek. Palivové tablety během vyhořívání bobtnají, proto je uvnitř tyče volný prostor s pružinou, která umožňuje rozpínání tablet. Uvnitř kazety mohou být umístěny regulační trubičky (tzv. klastry), které umožňují regulaci výkonu. Rovněž lze do kazety umístit nejrůznější měřicí čidla. Čerstvé palivové články obsahují pouze uran (pokud nejsou již při výrobě obohaceny o plutonium) a lze s nimi pracovat bez většího omezení (není nutné stínění, chlazení) [3].



Obr. 1.5: Palivový článek [3]

### Tepelná schémata

Podle použitého typu reaktoru se volí příslušný počet okruhů a typ pracovního média. Tlak v jednotlivých okruzích se směrem k reaktoru snižuje, aby se zamezilo úniku radioaktivity.

#### Jednookruhové JE:

Chladícím médiem je lehká voda a je zároveň pracovní látkou turbíny, pára tedy vzniká přímo v reaktoru. Výhodou je jeho větší účinnost, jelikož odpadají ztráty v parogenerátorech a kompenzátorech objemu. Naproti tomu radioaktivní chladivo prochází i zařízením strojnou, které trvale kontaminuje. Proto jsou nutná zvláštní bezpečnostní opatření. Toto uspořádání se používá u varných reaktorů [3].

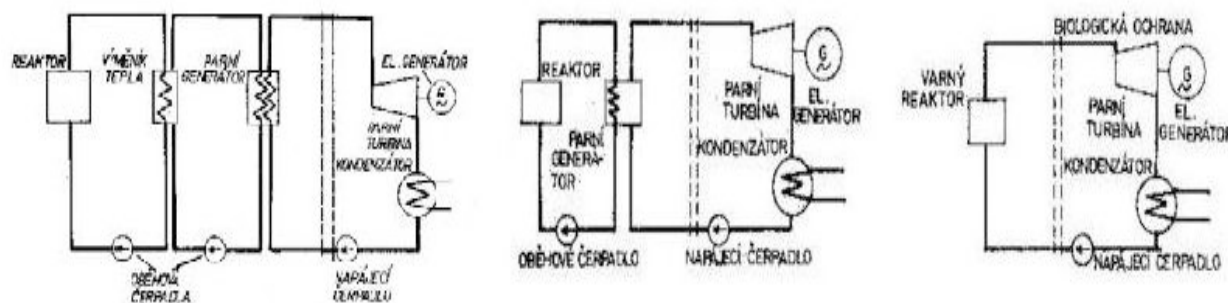
#### Dvouokruhové JE:

Umožňují použít různé typy chladiva. U těchto elektráren rozlišujeme primární a sekundární okruh, tyto okruhy jsou vzájemně odděleny parogenerátorem (ten produkuje páru, která se využívá jako v klasické tepelné elektrárně). Primární okruh musí být vybaven kompenzátorem objemu, který kompenzuje teplotní roztažnost chladicího média. Jedná se o nejčastější uspořádání jaderných elektráren [3].

#### Tříokruhové JE:

Toto uspořádání je typické pro rychlé reaktory, chlazené sodíkem. Má primární, sekundární a terciální okruh, a to z důvodu zvýšení bezpečnosti. Sekundární okruh odděluje primární (obsahuje

sodík) a terciální (obsahuje vodu), čímž zamezuje bouřlivé chemické reakci uvnitř reaktoru, která by nastala v případě kontaktu páry se sodíkem [3].



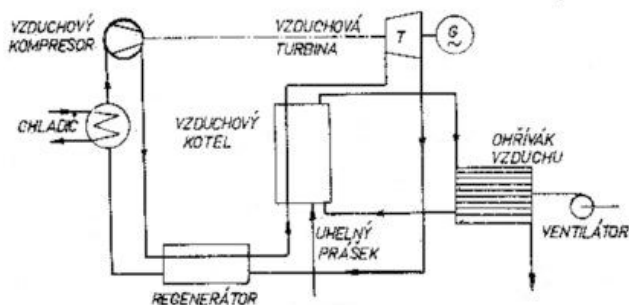
Obr. 1.6: Tepelná schémata JE [1]

### 1.3 Elektrárny se spalovacími turbínami

Palivo, společně se vzduchem z kompresoru, je vháněno do spalovací komory. Zde shoří a vytvoří proud spalin, který roztáčí turbínu. Turbína je umístěna na společné hřídeli s kompresorem a alternátorem, který generuje elektrický proud. Ke hřídeli je také připojen motor, který startuje soustrojí. Ve spalovací komoře je značný přebytek vzduchu, který spaliny ochladí na teplotu přijatelnou pro turbínu. Výkon soustrojí je roven součtu výkonu alternátoru a příkonu kompresoru. Tyto elektrárny jsou vhodné jako záložní a špičkové zdroje, jelikož se dají velmi rychle najíždět a odstavovat. Lze je také použít pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Nejsou příliš hospodárné, mají ale nízké pořizovací náklady.

#### Uzavřený oběh

Tohoto oběhu můžeme využít v případě použití paliva, jehož spaliny by mohly turbínu poškodit. K pohonu turbíny nevyužíváme spalin, ale stlačený vzduch, který ohříváme spalováním paliva ve vzduchovém kotli. Horký stlačený vzduch expanduje v turbíně, odkud jde do regeneračního ohříváku. Tam předá své zbylé teplo, vstupuje do chladiče a odtud do kompresoru. Z kompresoru pak proudí přes ohřívák zpátky do kotle [1].

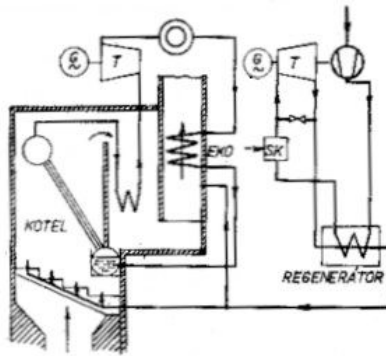


Obr. 1.7: Uzavřený oběh [1]

#### Paroplynový oběh

Tyto elektrárny kombinují klasický parní oběh s plynovým. V současnosti zažívají velký rozmach, jelikož mají vysokou účinnost a rychlou dobu náběhu. Menší nevýhodou je jejich relativně malý výkon (do 200MW na blok).

V tomto oběhu využíváme teplo spalin, vystupujících z turbíny, k ohřevu vody v elektrárenském kotli. Výfukové plyny jdou z výstupu turbíny do regeneračního ohříváku, kde předají část svého tepla napájecí vodě. Po výstupu z ohříváku jsou vháněny do kotle jako ohřátý vzduch [1].



Obr. 1.8: Paroplýnový oběh[1]

## 1.4 Vodní elektrárny

Vodní elektrárny mají i přes relativně malý instalovaný výkon nezastupitelnou úlohu v elektrizační soustavě, díky svému rychlému nájezdu totiž významně přispívají ke stabilizaci elektrizační soustavy. Turbína vodní elektrárny je napájena buďto z přehradní nádrže, nebo přímo z vodního toku pomocí tzv. derivačního kanálu.

Elektrárny dělíme podle spádu na nízkotlaké a vysokotlaké. Další dělení závisí na způsobu provozu, rozlišujeme elektrárny průtočné, akumulační a přečerpávací.

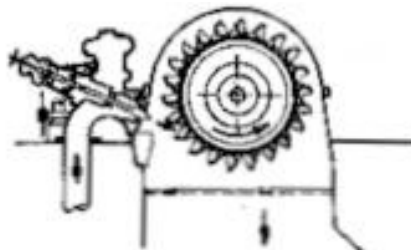
### Druhy turbín

Turbína převádí kinetickou a potenciální energii vody na mechanickou, většinou bývá umístěna na společné hřídeli s generátorem. Na rozdíl od turboalternátorů mají generátory ve vodních elektrárnách (hydroalternátory) velký počet pólů, aby se dosáhlo nízkých synchronních otáček.

Existuje celá řada turbín, které lze využít ve vodních elektrárnách. Konkrétní typ volíme podle průtoku a velikosti spádu. V následujícím popisu se zaměříme na nejčastěji užívané typy, zejména v malých vodních elektrárnách se však můžeme setkat i s jinými druhy.

#### **Peltonova turbína**

Skládá se z dýzy (trysky) a oběžného kola. Jedná se o rovnotlakou turbínu, která využívá kinetickou energii vody[3]. Voda vstupuje do dýzy, odkud dopadá na lopatky oběžného kola a roztáčí ho. Tyto turbíny se využívají hlavně v místech s vysokým spádem a malým průtokem vody.

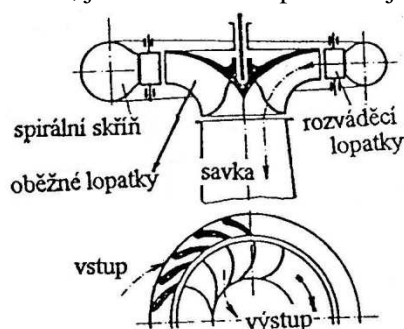


Obr. 1.9: Peltonova turbína[1]

#### **Francisova turbína**

Jedná se o reakční rovnotlakou a přetlakovou turbínu. Na rozdíl od Peltonovy turbíny dokáže využít jak kinetickou, tak tlakovou energii vody. Voda vtéká do statoru turbíny, který je tvořen spirálovitým potrubím. Stator, který obsahuje natáčecí lopatky, vodu rovnoměrně rozdělí na lopatky

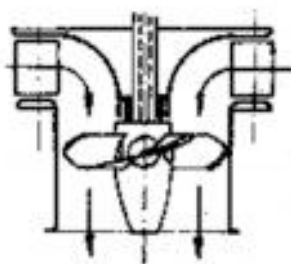
rotoru. Poté, co voda předá svou energii turbíně, vstupuje do savky [1]. Tyto turbíny se mimo jiné používají v přečerpávacích elektrárnách, jelikož dokážou pracovat jako pumpy.



Obr. 1.10:Francisova turbína[1]

### Kaplanova turbína

Jedná se o reakční turbínu. Tato turbína je tvořena statorem s natáčecími rozváděcími lopatkami a rotorem, který má také natáčecí lopatky. Díky tomu je možná regulace turbíny ve velkém rozsahu a hodí se proto do míst s proměnnými spády i průtoky [1]. Investiční náklady jsou však oproti jiným turbínám vyšší.



Obr. 1.11:Kaplanova turbína [1]

## 1.5 Fotovoltaické elektrárny

Slunce je považováno za nevyčerpatelný zdroj elektrické energie. Na povrch atmosféry naší planety dopadá energie  $1367 \text{ W/m}^2$  [7](tato hodnota je udávána jako solární konstanta). Část této energie se zmaří průchodem atmosférou, přesto na povrch Země při jasné obloze dopadá zhruba  $1000 \text{ W/m}^2$  (jedná se o průměrnou hodnotu, která závisí na konkrétní zeměpisné poloze, výšce slunce nad obzorem a také na obsahu pevných částic v atmosféře).

Fotovoltaické elektrárny slouží k přímé přeměně sluneční energie na energii elektrickou, přičemž využívají tzv. fotovoltaického jevu ve fotovoltaických článcích (ty jsou nejčastěji tvořeny křemíkem). Skupina článků tvoří tzv. panel, který produkuje stejnosměrné napětí. Účinnost přeměny ovlivňuje použitý typ panelu, množství a spektrum dopadajícího záření, teplota panelu a také úhel, pod kterým dopadají paprsky na jeho povrch [6].

### Fotoelektrický jev

Fotoelektrický článek si můžeme představit jako polovodičovou diodu. Dopadem fotonu na atom křemíku dojde k uvolnění elektronu z jeho vazby (za předpokladu, že je energie fotonu vyšší než vazebná energie). Uvolněný elektron se poté volně pohybuje v krystalu, na jeho původním místě vznikne díra. Elektrony jsou posouvány do oblasti N polovodiče, díry do oblasti P. Pokud tyto dvě oblasti vodivě spojíme, začne protékat proud [7].

## Typy fotovoltaických panelů

V současnosti se nejvíce využívají panely na bázi křemíku. Křemík je snadno dostupný, jeho výroba v požadované čistotě je ovšem energeticky náročná, což se výrazně projevuje na ceně panelu.

### **Monokrystalické články**

Jedná se o základní a nejstarší typ fotovoltaického článku. Dosahují nejvyšší účinnosti, jeho výroba je ale velice drahá [7]. Nejvyšší účinnosti dosahují při přímém osvětlení, nedokážou příliš zužitkovat difúzní záření. Proto jsou vhodné zejména k osazení tzv. trackerů, které sledují pohyb slunce po obloze a zajišťují tak maximální výkon panelu v průběhu dne.

### **Polykrystalické články**

V současnosti nejpoužívanější typ. Roztavený křemík se odlévá do forem a řeže se na tenké plátky, které tvoří povrch panelu. Jejich výroba je levnější než u článků monokrystalických, mají ale horší elektrické vlastnosti (účinnost, vnitřní odpor) [7].

### **Amorfni články**

Jedná se o nejnovější a také nejlevnější typ panelů na bázi křemíku. Křemík je nanášen ve velice tenkých vrstvách na povrch nosné podložky (kov, sklo, plast). Použitím vhodné nosné podložky tak můžeme vytvořit "ohebné" panely, které se dají využít místo střešní krytiny [7]. Nevýhodou těchto článků je jejich velice malá účinnost, dokážou však zužitkovat i difúzní záření, takže je možné je instalovat na plochy, kterou nejsou osvětleny přímým slunečním zářením.

## Typy instalací

Fotovoltaické systémy dodávají energii přímo do sítě, nebo pracují v ostrovním režimu. Podle toho se volí jednotlivé části (střídač, baterie) fotovoltaické elektrárny.

### **Ostrovní systémy**

Tyto systémy najdou uplatnění všude, kde by byla instalace elektrické přípojky neúnosně drahá. Elektrická energie, vyprodukovaná v panelu, je akumulována v baterii (pomocí regulátoru nabíjení). Z této baterie pak mohou být přímo napájeny některé spotřebiče (pokud umožňují provoz na stejnosměrné napětí dané hodnoty), nebo je z baterie napájen střídač, který vytvoří síť 230V 50Hz pomocí PWM modulace.

### **Systémy připojené na síť**

V tomto případě je veškerá elektrická energie dodávána přes střídač do elektrizační soustavy, nebo se spotřebovává v místě výroby a do elektrizační soustavy se dodává pouze její přebytek. Systémy, připojené na síť, jsou v současnosti rentabilní pouze při využití státních dotací.

## 1.6 Větrné elektrárny

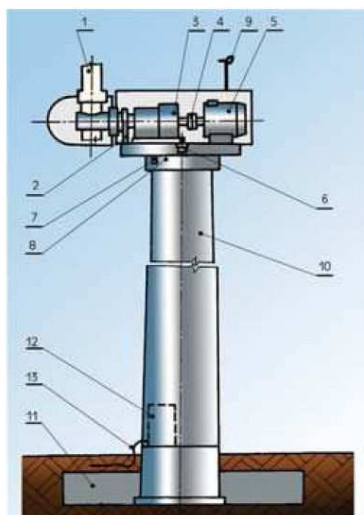
Stejně jako Slunce, je i vítr nevyčerpatelným zdrojem energie - je vyvoláván rozdílem tlaků na jednotlivých místech Země. Elektrárny jsou umístěny na sloupech, jelikož ve větší výšce je vyšší rychlost proudění větru a menší četnost turbulentních vírů. Vítr roztáčí větrný motor, který je mechanicky spojen s generátorem (nejčastěji synchronní u velkých výkonů nebo asynchronní u elektráren menších). Spojení může být přímé, nebo přes převodovku. Generátor je společně s brzdou a případnou převodovkou umístěn v kryté gondole.

## Typy větrných motorů

Větrný motor přeměňuje energii větru na točivý pohyb. Principiálně můžeme motory rozdělit na odporové a vztakové, podle uspořádání pak na horizontální a vertikální (nejsou závislé na směru větru).

### Vrtule

Rychloběžný typ vztakového větrného motoru. Dosahuje nejvyšší účinnosti až 45%. Vrtule je tvořena rotorovou hlavicí s několika listy a je umístěna na otáčivé gondole, která mění své natočení podle směru větru. Rovněž jednotlivé listy vrtule mohou být natáčivé pro snadnější regulaci a odstavení. Jedná se o nejpoužívanější typ[8].



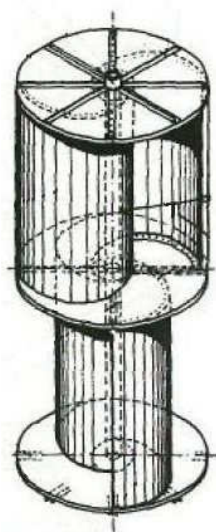
#### Základní části zařízení

- 1 - rotor s rotorovou hlavicí
- 2 - brzda rotoru
- 3 - planetová převodovka
- 4 - spojka
- 5 - generátor
- 6 - servo-pohon natáčení strojovny
- 7 - brzda točny strojovny
- 8 - ložisko točny strojovny
- 9 - čidla rychlosti a směru větru
- 10 - několikadílná věž elektrárny
- 11 - betonový armovaný základ elektrárny
- 12 - elektrorozvaděče silnoproudého a řídicího obvodu
- 13 - elektrická přípojka

Obr. 1.12:Elektrárna s větrnou vrtulí [8]

### Savoniův rotor

Jedná se o pomaloběžný odporový větrný motor. Jeho velkou výhodou je vertikální uspořádání, takže není závislý na směru větru a nevyžaduje natáčecí gondolu. Má ale celou řadu nevýhod. Jeho otáčky jsou nízké, takže vyžaduje pomaloběžný generátor. Také má několik mrtvých úhlů, při kterých se neroztočí. Mrtvé úhly lze eliminovat – například umístěním více vzájemně pootočených rotorů na společné hřídeli, nebo výrobou rotoru spirálovitého tvaru [9].



Obr. 1.13:Savoniův rotor [9]



### **Darrierův rotor**

Vztlakový, pomaloběžný větrný motor. Stejně jako savoniův rotor má vertikální uspořádání. Je tvořen zpravidla dvěma až třemi listy, které jsou nejčastěji ohnuty do oblouku podél osy. Tento rotor má velice malý rozběhový moment – je třeba jej napřed roztočit jiným strojem.



Obr. 1.14:Darrierův rotor [19]

## **1.7 Další typy elektráren:**

### **Solární elektrárny**

Tyto elektrárny přeměňují sluneční záření na teplo, které je pak využito k výrobě elektrické energie. Sluneční paprsky jsou pomocí soustavy zrcadel koncentrovány do jednoho místa, kde předají svou energii teplotněmu médiu. Teplo pak může být přeměněno na elektrickou energii několika způsoby. Lze z něj vyrobit páru, která pohání turbínu, nebo jej využijeme přímo k pohonu tepelného motoru (např. stirlingův motor). Elektrickou energii lze z tepla získat také v termočláncích. Také je možné slunečními paprsky ohřívat komín, čímž se uvnitř vytvoří tah, který pohání větrné turbíny.

### **Geotermální elektrárny**

Jsou principiálně podobné elektrárnám parním. Teplo však nezískávají spalováním fosilních látek, ale využívají teplo z nitra Země. To v praxi vypadá tak, že je teplotně médium vháněno do vrtů, kde dochází k jeho ohřevu. Pára pro pohon turbíny je pak produkována buďto přímo v samotném vrtu, anebo v parogenerátoru. Tyto elektrárny se stavějí v seismicky aktivních oblastech (typickým příkladem je Island).

Kromě výše jmenovaných existují ještě další druhy elektráren, např. elektrárny přílivové, bioplynové, osmotické a další. Jedná se ale většinou o zdroje s malým instalovaným výkonem.

## **2. Technologické členění elektráren**

Elektrárna je velice složité zařízení, které ke svému chodu vyžaduje celou řadu nejrůznějších zařízení a technologií. V následujícím textu budou popsány nejdůležitější části parních a jaderných elektráren.

### **2.1 Parní elektrárny**

#### **Úpravna napájecí vody**

Velký obsah rozpuštěných solí ve vodě může způsobovat její pění, které je nežádoucí. Také dochází k tvorbě kotelního kamene, který zhoršuje přestup tepla z ohniště a může způsobit poruchu kotle (způsobenou lokálním přehřátím). Pára, vyrobená v kotli, nesmí vytvářet nánosy solí v přehřívacích a turbíně - takové páře říkáme technicky čistá [5]. Abychom zabránili těmto jevům a získali technicky čistou páru, je nutné napájecí vodu upravit.

Z vody se nejprve pomocí filtrů odstraní pevné částice a poté se změkčí (dojde k výměně vápenatých a hořečnatých solí za sodné). Následně se vhodnými chemickými příměsemi upraví její alkalita. Pro napájení průtočných kotlů se voda ještě dále demineralizuje – destiluje se, přičemž se využívá teplo z odběru turbíny [1].

#### **Skladování a úprava paliva**

Palivo je do elektrárny dopravováno nejčastěji po železnici, případně dopravníkem přímo z dolu. Po vyložení z vagonů je uhlí umístěno na skládku, odkud se postupně odebírá. Odebrané uhlí se v mlýnech rozdrťí na potřebnou hrubost a putuje dále do kotle.

#### **Elektrárenský kotel**

Elektrárenský kotel se skládá z ohniště a parogenerátoru. Uvnitř parogenerátoru se přeměňuje napájecí voda na páru jejím zahříváním z ohniště. Tato napájecí voda může být před vstupem do kotle ohřívána v ekonomizéru (ten vodě předává odpadní teplo ze spalín), kondenzátoru, nebo regeneračním ohřevem. Aby palivo v ohništi dobře prohořelo, je zapotřebí přívodu vzduchu (ten zpravidla bývá před vstupem do kotle ohříván) a odvodu spalín. To obstarává tah, který může být přirozený (je dán vztlakem horkých spalín) nebo umělý (ventilátor, ejektor) [5].

Existuje několik typů ohnišť pro tuhá paliva, která se od sebe liší způsobem spalování.

#### **Roštové ohniště**

Vyskytují se spíše u kotlů menší výkonů. Uhlí je spalováno na pohyblivém roštu, který rovnoměrně rozděluje vzduch. Na roštu zůstávají zbytky spáleného paliva, které se transportují do škvárové výsypky. Na rostech lze spalovat uhlí s obsahem popela 30-40% [5].

#### **Prášková ohniště**

Palivo se rozdrťí na jemný prach, který se smísí se vzduchem a je vháněn skrz hořáky do ohniště. Spalování uhlí probíhá v letu. Tato ohniště se používají pro kotle velkých výkonů (nejsou výkonově nijak omezena), umožňují spalovat uhlí s obsahem popela vyšším než 55%. Mají také vyšší účinnost než ohniště roštová, jejich nevýhodou je ovšem vysoký úlet paliva. Tato ohniště se dále dělí na granulární (spalují méně hodnotná paliva za nižší teploty) a výtavná (spalují palivo za vysokých teplot, struska je odváděna v tekutém stavu) [5].

#### **Cyklónová ohniště**

Podstatou své funkce jsou podobná práškovým. Palivo se ovšem nemele tak jemně a jeho výstupní rychlost z hořáku je mnohem vyšší. To vyvolá silné víření v celém prostoru ohniště. Cyklónové ohniště zachytí velké množství popela – až 95% [5].

### **Fluidní ohniště**

Ohniště má nálevkovitý tvar. Rozdrcené palivo je nadnášeno vzduchem, který proudí svisle vzhůru. Díky tomu dojde k rozvrstvení paliva do různých výšek podle jeho zrnitosti. Větší částice se spalují ve spodní (zúžené) části, lehčí v části horní. Na výhřevných plochách nevznikají nánosy, lze spalovat i méně kvalitní paliva [5].

Kotle dále dělíme podle typu použitého parního generátoru na:

### **Průtočné**

Kotel má nucený průtok celým systémem parního generátoru (ten se skládá z paralelně řazených trubek), žádná část vody necirkuluje. Výhodou těchto kotlů je jejich relativně jednoduchá konstrukce, vyžadují ovšem náročnější úpravu napájecí vody [5]. Jsou vhodné zvláště pro vysoké tlaky [1].

### **Bubnové**

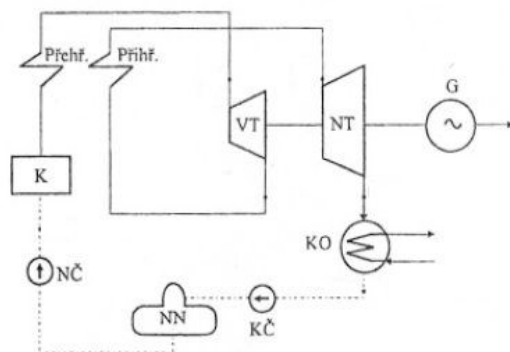
V tomto kotli voda neustále cirkuluje dokola (průtok může být nucený i přirozený), dokud nedojde k jejímu odpaření. V kotli se nachází tzv. buben, ve kterém dochází k oddělování vody a páry. Výška parního prostoru bubnu musí být vyšší, než je dolet vodní tříště, aby se pára neznečistila přestříkáním kotelní vody. V bubnových kotlích dochází k zahušťování solí, vzniká tzv. odluh a odkal, které se musí odstraňovat [5]. Odluh se odstraňuje průběžně, značnou část jeho tepla můžeme odebrat v expandéru a odvést zpět do tepelného oběhu [1].

### **Přehřívání páry**

Pára, vystupující z kotle, je přehřívána v tzv. přehřívacích. V těch dochází k jejímu vysoušení a ohřevu na konstantní teplotu. V současnosti se užívá výhradně přehřátá pára vysokého tlaku, jelikož provoz za využití syté páry je neekonomický a navíc hrozí nebezpečí kondenzace vlhkosti v posledních stupních turbíny [1]. Přehříváky mohou být konvekční (jsou umístěny v proudě spalín), nebo sálavé (jsou umístěny v horní části ohniště) [5]. Pára z přehříváku vstupuje do turbíny.

### **Přihřívání páry**

Pro přihřívání je turbína rozdělena do několika částí (vysokotlaká, středotlaká, nízkotlaká) podle tlaku páry. Pára mezi jednotlivými stupni turbíny vstupuje do kotle, kde je dodatečně ohřívána v přihřívacích. Tím můžeme zvýšit účinnost cyklu (o 2-4% [2]), snížit vlhkost páry a tím i opotřebení turbíny a zvýšit spolehlivost [1]. Přihřívání se většinou provádí pouze u bloků velkých výkonů, protože komplikuje jeho regulaci a zvyšuje investiční náklady [2].



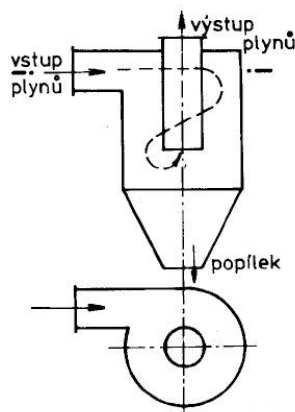
Obr. 2.1: Schéma tepelného oběhu s přehříváním páry[2]

## Čištění spalin

Spaliny, které vystupují z kotle, mohou představovat riziko pro životní prostředí. Proto je důležité ze spalin odstranit nežádoucí látky. Spaliny sebou unášejí popílek ve formě pevných částic, jeho koncentrace ve spalinách závisí na použitém typu ohniště, druhu paliva a jeho zrnitosti [4]. Ten je třeba ze spalin odloučit. Odloučený popílek se využívá ve stavebnictví na výrobu pórobetonových hmot.

### Mechanické odlučovače popílku

Jsou vhodné spíše pro kotle menších výkonů a pro spaliny s obsahem větších částic. Mezi nejběžnější patří odlučovače cyklónové. Spaliny do něj vstupují velkou rychlostí a pevné částice jsou odstředivou silou vytlačeny na jeho stěny, odkud padají do sběrače[1]. Dosahují účinnosti 60 – 80% [4]. Jelikož je jejich účinnost závislá na průtoku spalin, sestavují se do baterií, tzv. multicyklónů. Tím se dosáhne vysoké odlučivosti nezávisle na změnách výkonu kotle [1].



Obr. 2.2: Cyklónový odlučovač[4]

### Elektrostatické odlučovače popílku

Tyto odlučovače jsou nejvhodnější k použití v elektrárnách, jelikož dosahují vysoké účinnosti (až 99% při pravidelném čištění) a jsou schopny odstranit ze spalin i velice jemné frakce (5 - 10 $\mu$ m)[4]. Tento odlučovač je napájen stejnosměrným vysokým napětím o velikosti 50 – 70kV. Je tvořen usazovací elektrodou ve tvaru válce (kterou proudí spaliny a je připojena na kladný pól zdroje) a elektrodou sršící (ta je připojena na záporný pól), umístěnou uprostřed válce. Na sršící elektrodě vzniká korónový výboj, který ionizuje spaliny. Nabité částice popílku se poté usadí na usazovací elektrodě, odkud jsou mechanicky odstraněny[1].

### **Odsiřování spalin**

Mezi další nežádoucí látky ve spalinách patří oxidy síry. K zamezení jejich úniku se proto v elektrárnách instalují odsiřovací technologie. Těchto technologií existuje celá řada, přičemž u elektráren na našem území je nejběžnější tzv. mokrá vápencová vypírka [4]. Tato technologie se instaluje za filtr pevných částic (odlučovač). Ochlazené spaliny vstupují do rozprašovací komory, kde prochází vodní mlhou (ta je tvořena vypírací vápennou suspenzí). Vypírací suspenze se poté odloučí od spalin, které se ohřejí nad rosný bod (pomocí výměníku) a vypouští do komínu. Odloučená suspenze se dále zpracovává, výsledným produktem je tzv. energosádrovec [4]. Ten je poté možné využít ve stavebnictví k výrobě omítacích směsí a sádkokartónu. U fluidních kotlů je možné vhnět rozdrčený vápenec přímo do ohniště, vyprodukovaný popílek je však chemicky nestabilní a nedá se dále využívat.

### **Denitrifikace spalin**

Další látky, jejichž koncentraci je žádoucí snížit na minimum, jsou oxidy dusíku. Na rozdíl od oxidů síry lze koncentrace oxidů dusíku podstatně snížit už samotnou optimalizací spalovacího procesu (primární opatření), a až poté se přistupuje k čištění spalin (sekundární opatření) [4].

#### Primární opatření:

Oxidy dusíku ve spalinách mohou mít různý původ. Část jich vzniká oxidací vzdušného dusíku v kotli za vysokých teplot (termické  $\text{NO}_x$ ), část jich je vázána přímo v palivu (palivové  $\text{NO}_x$ ), některé vznikají v oblasti bohaté směsi (promptní  $\text{NO}_x$ ). Největší vliv na snížení množství  $\text{NO}_x$  ve spalinách má snížení přebytku vzduchu na co možná nejnižší možnou teplotu. Pozitivní vliv na koncentrace má také snížení efektivní spalovací teploty a zkrácení doby setrvání spalin v oblasti vysokých teplot [4].

#### Sekundární opatření:

Tato opatření spočívají v chemickém vázání oxidů dusíku. Využívají se redukční (odbourání pomocí čpavku  $\text{NH}_3$  na  $\text{N}_2$ ) nebo oxidační procesy (oxidace  $\text{NO}$  pomocí ozónu na  $\text{NO}_2$ , který je poté opět vázán čpavkem)[4].

## **2.2 Jaderné elektrárny**

I když jsou svým principem podobné elektrárnám parním a obsahují tedy obdobné součásti, vyžadují některé další provozní podmínky navíc. To je dáno jednak zvýšenými nároky na bezpečnost, ale také produkcí radioaktivního odpadu.

### **Jaderný reaktor**

V jaderném reaktoru dochází k přeměně energie paliva na teplo. Moderní reaktory pro energetické účely jsou výhradně v provedení heterogenním (jaderné palivo je odděleno od moderátoru). Konstrukcí reaktorů existuje celá řada, přičemž se od sebe liší jak vlastním provedením, tak způsobem provozu.

Základní částí reaktoru je aktivní zóna, ve které je uloženo palivo. Aktivní zóna je vyplněna moderátorem, který zpomaluje volné neutrony a zvyšuje tak pravděpodobnost srážky s jádrem (výjimku tvoří tzv. rychlé reaktory, které moderátor nemají). Teplo je z aktivní zóny odváděno chladícím médiem. Součástí reaktoru je reflektor, který odráží neutrony zpět do aktivní zóny. Moderní reaktory jsou umístěny v ochranné obálce (kontejmentu), který zabraňuje úniku radioaktivity do okolí. Reaktor je řízen pomocí soustavy tyčí, které se vsouvají do reaktoru a pohlcují neutrony.

#### Regulační tyče:

Slouží k regulaci výkonu reaktoru, jeho najíždění a odstavení. Výkon reaktoru může být také v určitých mezích regulován přidáváním kyseliny borité do chladicí vody.

Kompenzační tyče:

Tyto tyče kompenzují vliv vyhoření paliva. Zajišťují tedy jeho konstantní výkon po celou dobu kampaně.

Havarijní tyče:

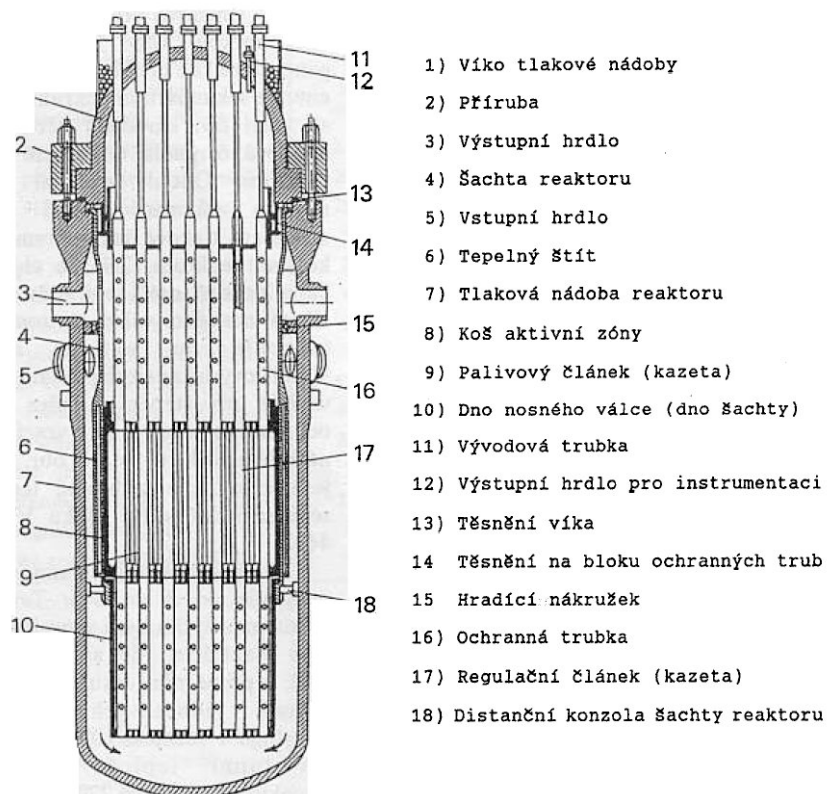
Umožňují rychlé odstavení reaktoru v případě poruchy.

### Typy jaderných reaktorů

#### Tlakovodní reaktory

Jedná se o nejrozšířenější typ reaktorů. Celý reaktor je umístěn v tlakové nádobě válcového tvaru (kulový tvar by byl výhodnější, je ale nepraktický). Chladicím médiem je nejčastěji lehká voda, která zároveň plní funkci moderátoru (lze použít i těžkou vodu). Elektrárny, využívající tyto reaktory, jsou zásadně dvouokruhové, přičemž v primární části nesmí docházet k vývinu páry (bublinky páry v chladicím médiu by znemožnily účinné chlazení aktivní zóny). Reaktor má několik chladicích smyček, kterými dovnitř proudí chladicí médium. Tlak v primárním okruhu bývá v rozmezí 10 až 16MPa, teplota do 335°C. Mezi tyto reaktory patří i u nás používané VVER [3].

Tyto reaktory neumožňují výměnu paliva za chodu, výměna probíhá tzv. mokrou cestou, kdy se zaplaví šachta nad víkem reaktoru. Tato voda chladí vyhořelé palivo a zároveň stíní nebezpečné záření, čímž chrání obsluhu při jeho výměně.



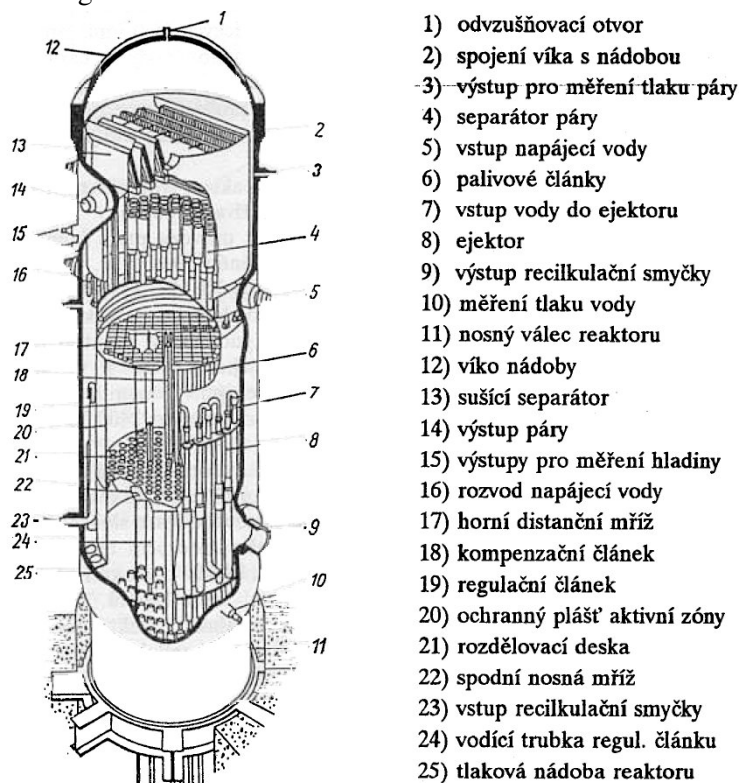
Obr. 2.3: podélný řez reaktorem VVER 440 [3]

#### Varné reaktory

Jedná se o druhý nejrozšířenější typ reaktorů. Reaktor samotný je opět umístěn v tlakové nádobě ve tvaru válce. Jako chladivo a moderátor se používá lehká voda a stejně jako tlakovodní reaktory pracují se sytou párou. Na rozdíl od nich však pára nevzniká v parogenerátoru, ale přímo v

aktivní zóně reaktoru. Takto vzniklou páru je třeba zbavit vlhkosti v separátorech, umístěných v horní části tlakové nádoby nad aktivní zónou. To ovšem způsobuje komplikace v konstrukci reaktoru, jelikož ovládání tyčí a vývody čidel musí být umístěny pod spodním dnem tlakové nádoby. Elektrárny s varnými reaktory jsou jednookruhové [3].

Mezi varné reaktory řadíme i dnes už téměř nepoužívané reaktory kanálové (RBMK). Tímto reaktorem byla vybavena první jaderná elektrárna v Obninsku, ale také nechvalně známá elektrárna v Černobylu. Jedná se o grafitem moderovaný reaktor, který má aktivní zónu složenou z grafitových bloků, uvnitř kterých proudí tlakovými kanály chladicí médium. Tento reaktor má své výhody – není zapotřebí tlaková nádoba, má relativně jednoduchou konstrukci a velký výkon. Rovněž umožňuje výměnu paliva bez nutnosti jeho odstávky. Jeho velkou slabostí je ovšem kladný dutinový koeficient, který zhoršuje možnosti regulace.



- 1) odvzdušňovací otvor
- 2) spojení víka s nádobou
- 3) výstup pro měření tlaku páry
- 4) separátor páry
- 5) vstup napájecí vody
- 6) palivové články
- 7) vstup vody do ejektoru
- 8) ejektor
- 9) výstup recirkulační smyčky
- 10) měření tlaku vody
- 11) nosný válec reaktoru
- 12) víko nádoby
- 13) sušící separátor
- 14) výstup páry
- 15) výstupy pro měření hladiny
- 16) rozvod napájecí vody
- 17) horní distanční mříž
- 18) kompenzační článek
- 19) regulační článek
- 20) ochranný plášť aktivní zóny
- 21) rozdělovací deska
- 22) spodní nosná mříž
- 23) vstup recirkulační smyčky
- 24) vodící trubka regul. článku
- 25) tlaková nádoba reaktoru

Obr. 2.4: Varný reaktor [3]

### ***Plynem chlazené reaktory***

Tyto reaktory využívají jako chladicí médium plyn. Moderátorem může být grafit, nebo těžká voda. Elektrárny s těmito reaktory jsou dvouokruhové. Tyto reaktory se dále dělí podle teploty v aktivní zóně.

#### Nízkoteplotní (Magnox):

Jako palivo se používá uran v kovové formě, moderátorem je grafit. Výhodou je možnost používat přírodní (neobohacený uran), vzhledem ke kovové formě paliva je však provoz možný pouze za nízkých teplot (do 410°C), což značně komplikuje konstrukci parogenerátoru. Investiční náklady na stavbu jsou značné (velké rozměry aktivní zóny), elektrárna má velkou vlastní spotřebu. Kvůli nízkým teplotám je účinnost termického cyklu relativně malá (do 30%). Palivové články lze měnit za provozu [3].

#### Pokročilé (AGR):

Principiálně se podobají reaktorům Magnox. Jako palivo ale využívají mírně obohacený uran ve formě kysličníku. To umožňuje zvýšit teplotu aktivní zóny, čímž klesne její velikost a vzroste termická účinnost cyklu[3].

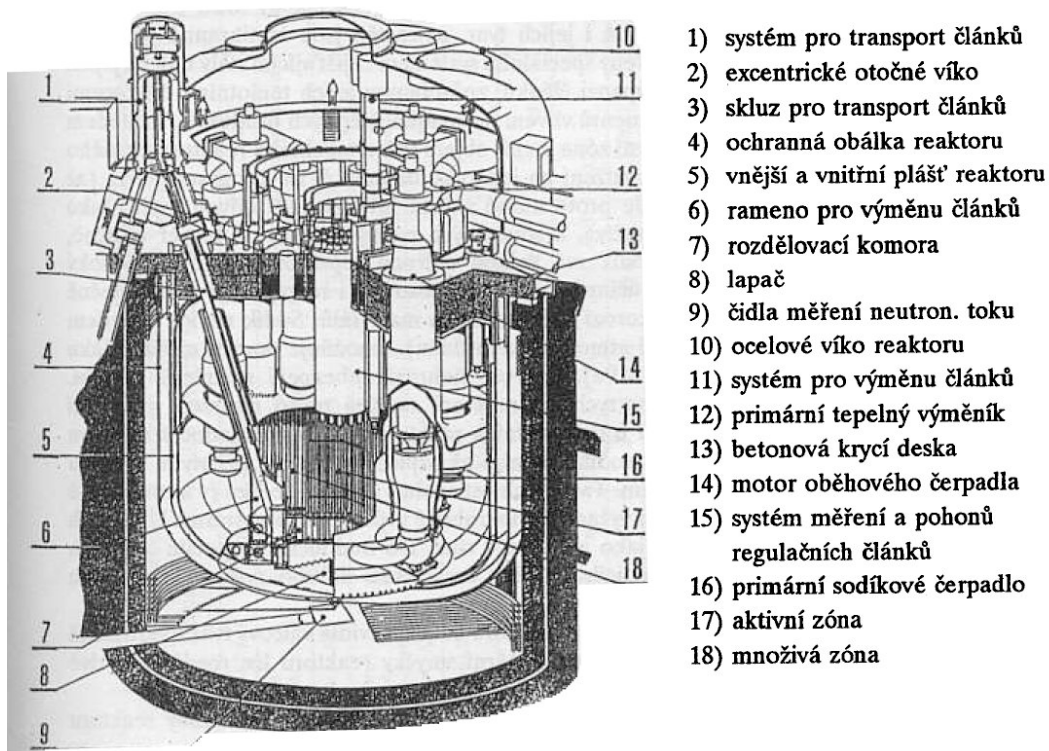
#### Vysokoteplotní (HJTGR):

Tyto reaktory jsou zatím ve vývoji. Jako moderátor slouží grafit, chladivem je hélium o tlaku 3-5MPa. Palivem je silně obohacený uran ve formě mikročlánků. Výhodou tohoto reaktoru je vysoká teplota hélia na jeho výstupu (až 780°C), což umožňuje vysokou teplotu páry na výstupu parogenerátoru a tím tedy i velkou účinnost. Uvažuje se i o využití plynové turbíny v jednookruhovém oběhu [3].

#### **Rychlé reaktory**

Jako palivo se nejčastěji používá obohacený uran (17-35% [3]). Tyto reaktory nemají moderátor, štěpení probíhá za pomoci rychlých neutronů. Konstrukce aktivní zóny reaktoru je uzpůsobena tak, aby docházelo k co nejmenšímu pohlcování neutronů. Nadbytku neutronů totiž reaktor využívá k přeměně neštěpitelných materiálů na štěpitelné ( $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ ). Také účinnost termického cyklu je vyšší díky vysoké teplotě na výstupu reaktoru.

Aktivní zóna je oproti konvenčním reaktorům velmi malá a vyžaduje velice intenzivní chlazení. Jako chladicí médium se proto nepoužívá voda (která by navíc zpomalovala neutrony), ale tekuté kovy - nejčastěji sodík. Palivové tyče jsou umístěny těsně vedle sebe, okolo aktivní zóny jsou v tzv. množivé zóně rozmístěny tyče, které obsahují  $^{238}\text{U}$ . Množivá zóna zároveň plní funkci reflektoru [3].



- 1) systém pro transport článků
- 2) excentrické otočné víko
- 3) skluz pro transport článků
- 4) ochranná obálka reaktoru
- 5) vnější a vnitřní plášť reaktoru
- 6) rameno pro výměnu článků
- 7) rozdělovací komora
- 8) lapač
- 9) čidla měření neutron. toku
- 10) ocelové víko reaktoru
- 11) systém pro výměnu článků
- 12) primární tepelný výměník
- 13) betonová krycí deska
- 14) motor oběhového čerpadla
- 15) systém měření a pohonů regulačních článků
- 16) primární sodíkové čerpadlo
- 17) aktivní zóna
- 18) množivá zóna

Obr. 2.5: Rychlý reaktor Super Phenix [3]



## 3. Elektrická část elektráren

### 3.1 Alternátory

Ve většině elektráren slouží ke generování elektrické energie synchronní alternátory, pouze u vodních a větrných elektráren malých výkonů se k tomuto účelu někdy používá asynchronních generátorů. Alternátory se vyrábí v širokém rozsahu výkonů i výstupních napětí.

#### Důležité parametry alternátorů

##### **Otáčky:**

Otáčky alternátoru jsou závislé na počtu pólových dvojic stroje a kmitočtu sítě, do které pracuje.

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p}$$

##### **Účinník:**

Účinník stroje lze měnit změnou buzení. U velkých strojů dosahuje hodnot 0,85 až 0,95 [10]. Volba účinníku závisí na umístění stroje a jeho úloze v elektrizační soustavě. S klesajícím účinníkem rovněž roste cena alternátoru. U alternátoru v ostrovním režimu je jeho účinník dán skladbou spotřebičů, které napájí [3].

##### **Zkratový poměr:**

Je to poměr statorového proudu nakrátko k jmenovitému proudu statoru při buzení odpovídajícímu jmenovitému napětí stroje. Lze jej také vyjádřit jako převrácenou hodnotu synchronní reaktance [1].

$$\nu = \frac{I_{KO}}{I_N} \quad [10]$$

Velikost tohoto parametru ovlivňuje celou řadu vlastností stroje. S klesajícím poměrem roste vliv reakce kotvy a tím dochází ke změnám svorkového napětí (stroj je tzv. měkký). Z hlediska statické stability stroje je žádoucí, aby byl zkratový poměr stroje co největší. S rostoucím zkratovým poměrem ovšem roste také hmotnost a tím i cena stroje [10]. Obecně platí, že čím nižší je zkratový poměr, tím větší jsou požadavky na dynamické vlastnosti regulátoru buzení.

##### **Reaktance:**

Při dodávkách energie do sítě se u alternátoru projevuje jeho impedance, která závisí na provozním stavu stroje a jeho konstrukci. Jelikož je činný odpor vinutí oproti jeho reaktanci malý, většinou jej neuvažujeme. Hovoříme proto pouze o reaktanci stroje. Hodnoty jednotlivých reaktancí lze vyjádřit buďto v absolutních, nebo poměrových hodnotách. Jejich měřením se zabývá norma ČSN IEC 34-4.

Parametr		Turbo- alternátory	Hydro- alternátory
Synchronní reaktance podélná	$X_d$	- 1,2 -3	0,7 -1,4
Synchronní reaktance příčná	$X_q$	- 1,1 -2,2	0,45-0,9
Přechodná reaktance podélná	$X'_d$	- 0,15-0,3	0,2 -0,4
Rázová reaktance podélná	$X''_d$	- 0,09-0,3	0,15-0,35
Rázová reaktance příčná	$X''_q$	- 0,1 -0,25	0,15-0,7
Přechodná časová konstanta naprázdno	$T'_{do}$	s 2 -10	3 -10
Nulová reaktance	$X_0$	- 0,02-0,15	0,03-0,15
Zpětná reaktance	$X_2$	- 0,09-0,3	0,12-0,4
Přechodná časová konstanta nakrátko	$T'_d$	s 0,6 -1,5	0,8 -2,5
Rázová časová konstanta nakrátko	$T''_d$	s 0,02-0,08	0,04-0,1
Časová konst. stejnosměrné složky	$T_a$	s 0,05-0,5	0,1 -0,4

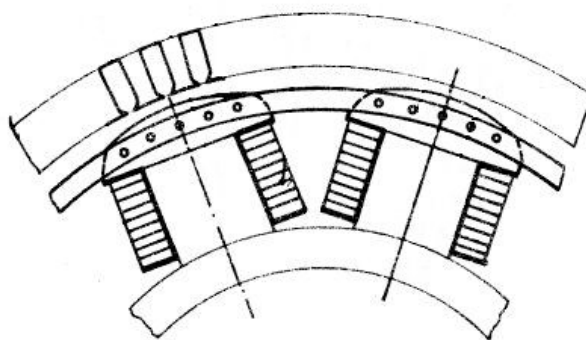
Obr. 3.1: Přehled poměrových reaktancí turboalternátorů [10]

## Rozdělení alternátorů

### Hydroalternátor

Na rozdíl od parních turbín je u turbín vodních problematické dosáhnout vysokých otáček. Používají se proto mnohopólové stroje s vyniklými póly, tzv. hydroalternátory. Ty mají jmenovité otáčky v řádech desítek až stovek za minutu. Uložení soustrojí je nejčastěji vertikální, ale zejména u elektráren malých výkonů může být i šikmé nebo horizontální. Chlazení stroje je jednodušší než u turboalternátoru díky větší ploše rotoru a mezerám mezi vyniklými póly. Rotory velkých strojů jsou chlazeny vzduchem, stator může být chlazen vodou.

Budící vinutí je tvořeno cívkami, které jsou uloženy na jádrech jednotlivých pólů. Často bývá provedeno jako odstupňované, aby se co nejlépe využil prostor mezi pólovými nástavci. V pólových nástavcích pak může být umístěno tlumící vinutí ve formě tyčí.

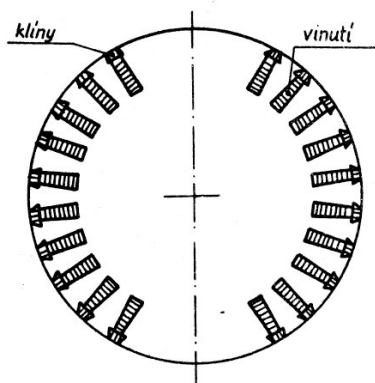


Obr. 3.2: část rotoru a statoru hydroalternátoru [12]

### Turboalternátor

Turboalternátory v parních a jaderných elektrárnách jsou stroje s hladkým rotorem, nejčastěji dvoupólové (tj. 3000ot/min pro 50Hz). Parní turbína má totiž nejvyšší účinnost při otáčkách v řádech tisíců za minutu. Pouze u strojů velmi velkých výkonů se využívá čtyřpólového rotoru, vzhledem k jeho omezené mechanické pevnosti [3].

Na rotoru turboalternátoru jsou drážky, ve kterých je uloženo budící vinutí. Vinutí je v drážkách zajištěno klíny z nemagnetických materiálů, které mohou zároveň plnit funkci tlumiče (amortizéru) [12]. Vzhledem k vysokým otáčkám rotoru na něj působí značné odstředivé síly, proto je žádoucí, aby byl průměr rotoru co možná nejmenší. S klesajícím průměrem rotoru ale roste jeho délka, což celou situaci komplikuje. Čím je rotor delší, tím větší vibrace vznikají při provozu stroje[1]. Navíc vzniká riziko jeho prověšení - proto jsou soustrojí velkých výkonů vybavena elektromotorem, který jím v době odstávky neustále otáčí a eliminuje tak riziko prohnutí hřídele.



Obr. 3.3: Průřez rotorem turboalternátoru [12]

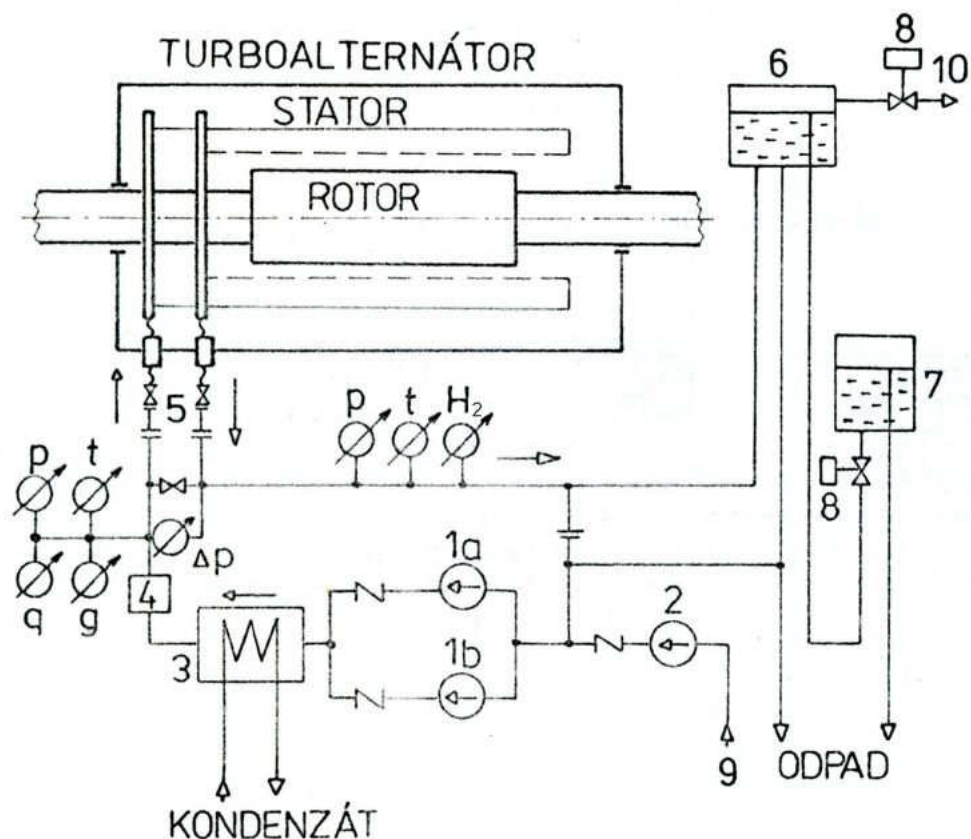
### Chlazení alternátorů

I když je účinnost alternátorů značná (až 99% [12]), vyvíjí se v nich velké množství tepla, které je nutno odvést. Také je žádoucí udržovat teplotu vinutí konstantní a tím zamezit jeho mechanickým pnutím, které zkracuje životnost izolace [13]. U strojů malých výkonů je dostačující chlazení vzduchem, odpadní teplo se ale nedá nijak využít a navíc hrozí riziko požáru stroje při havárii. Chlazení strojů velkých výkonů je proto realizováno jinými médii – nejčastěji vodíkem, vodou, nebo kombinací obojího.

Statorová drážka				
Chlazení	Vzduch	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O
Rotorová drážka				
Chlazení	Vzduch	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Výkon v MVA	50	250	1000	2000

Obr. 3.4: Přehled vodičů v závislosti na použitém chladicím médiu [11]

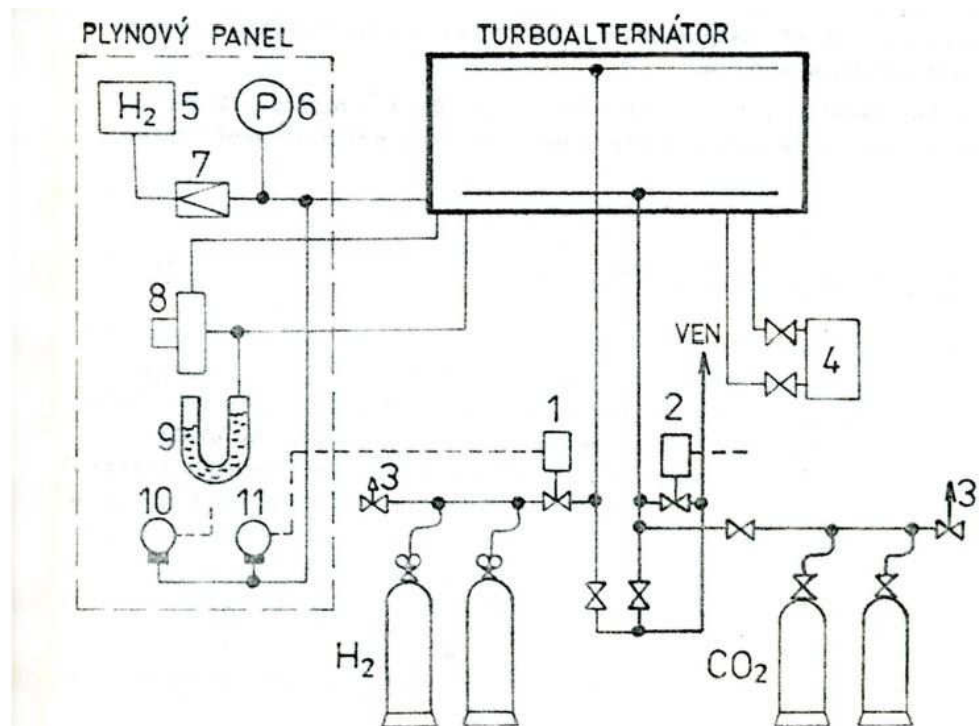
Statorové vinutí je nejčastěji chlazeno vodou (např. napájecí vodou pomocí výměníku). Voda protéká buďto dutými vodiči, nebo speciálními vložkami ve vinutí. Také může být chlazen i magnetický obvod stroje axiálními kanály. Výhodou vody je její nehořlavost, nízká viskozita a rovněž nepůsobí chemicky na materiál izolace.



- |                                                            |                                     |
|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 – pracovní a záložní čerpadlo                            | 6 – vyrovnávací nádoba              |
| 2 – podávací čerpadlo                                      | 7 – sifon (přepad)                  |
| 3 – chladič                                                | 8 – automatické uzavírání           |
| 4 – mechanický filtr                                       | 9 – čistá voda z filtrovací stanice |
| 5 – vyjímatelní vložky při měření izolačního stavu statoru | 10 – vývod k vývěvě pro odplynění   |

Obr. 3.5: Vodní chlazení turboalternátoru [11]

Rotor bývá chlazen vodíkem. Oproti vzduchu má větší tepelnou kapacitu, díky jeho malé hustotě jsou i menší ventilační ztráty. Vodíková atmosféra také chrání rotor před případným požárem při havárii a zamezuje oxidaci izolace ozónem. Alternátor je umístěn ve vzduchotěsném krytu a vývody hřídelí jsou osazeny olejovými ucpávkami. Oběh vodíku zajišťuje kompresor, který může být poháněn samotnou turbínou. Při prvotním plnění musí být obal alternátoru nejdříve napuštěn inertním plynem, aby se zamezilo vzniku třaskavé směsi. Tlak vodíku je vyšší než tlak chladicí vody statoru – při případné netěsnosti tak dochází k pronikání vodíku do chladicí vody, kde jej lze poměrně snadno detekovat. Odpadní teplo je možné pomocí výměníku dodat do napájecí vody.



- |                                          |                                     |
|------------------------------------------|-------------------------------------|
| 1, 2 – přepouštěcí ventily               | 7 – regulátor konstantního průtoku  |
| 3 – pojistný ventil                      | 8 – měřící ventilátor               |
| 4 – vysoušeč vodíku se silikagelem       | 9 – měření čistoty plynů při plnění |
| 5 – analyzátor vodíku dle tep. vodivosti | 10 – signalizace tlaku              |
| 6 – měření tlaku                         | 11 – automatické přepouštění vodíku |

Obr. 3.6: Vodíkové chlazení turboalternátoru [11]

### Tlumící vinutí (amortizér)

Jedná se o rotorové vinutí trvale spojeno nakrátko. Při ustáleném synchronním chodu se nijak neuplatní, jelikož je vzájemná rychlost rotoru a magnetického pole statoru nulová. Při změnách pracovního bodu se ale do něj začnou indukovat proudy a vzniklé elektromagnetické síly a pole ovlivňují vlastnosti stroje. Použití tlumícího vinutí přináší celou řadu výhod: zmenšuje oteplení rotoru při nesymetrické zátěži, chrání budicí obvod proti přepětím a proudovým rázům, omezuje kývání rotoru a zlepšuje statickou i dynamickou stabilitu. Rovněž zmenšuje přepětí, vzniklé při nesymetrickém zkratu na nepostižené fázi. Je-li tlumící vinutí patřičně dimenzováno, lze jej použít k rozběhu soustrojí. Jeho nevýhodou je ovšem vyšší cena stroje a větší namáhání pólových nástavců, navíc zvětšuje proudové rázy při zkratech [14].

Samotné vinutí lze realizovat několika způsoby. Mohou to být ploché vodiče, umístěné v každé drážce pod zajišťovacím klínem [3]. Jako tlumič se dají použít i samotné zajišťovací klíny, pokud jejich čela vhodně propojíme. U hydroalternátorů je tlumící vinutí tvořeno tyčemi v pólových nástavcích, případně samotnými pólovými nástavci (jsou-li z plného materiálu).

### Vývody alternátoru

Vývody alternátorů mohou být provedeny několika způsoby. U strojů malých výkonů se používá kabelů, případně pásových vodičů. U strojů velkých výkonů je však třeba brát v potaz síly, působící na vodiče při zkratu. Proto se používá zapouzdřených vodičů, izolovaných plynem SF<sub>6</sub>.

Použití zapouzdřených vodičů přináší celou řadu výhod. Jednotlivé fáze jsou od sebe bezpečně odděleny, čímž se zamezí případnému mezifázovému zkratu. Rovněž se redukuje magnetické pole v

okolí vodičů, takže se neindukují vířivé proudy do okolních kovových konstrukcí. Ztráty, vzniklé indukovaním vířivých proudů do tělesa pouzdra, lze omezit vhodným pospojováním a zemnáním.

### Buzení alternátoru permanentním magnetem

U alternátoru malých výkonů obstarává buzení permanentní magnet, který je umístěn na rotoru stroje. Výhoda tohoto provedení tkví v tom, že alternátor ke svému provozu nepotřebuje externí zdroj elektrické energie (to je žádoucí zejména u ostrovních systémů). Také účinnost cyklu je vyšší, jelikož alternátor nespotřebovává část vyrobené energie v budiči. Nevýhodou je vyšší cena takového alternátoru a nemožnost regulace buzení. Buzení permanentními magnety se proto používá u zdrojů malých výkonů, zejména u vodních a větrných elektráren. Výjimku tvoří pouze alternátory některých velkých vodních elektráren, se kterými se počítá jako se zdroji vlastní spotřeby pro jaderné a parní elektrárny v případě blackoutu. Tyto elektrárny schopny nájezdu bez dodávky elektrické energie zvenčí (tzv. blackstart).

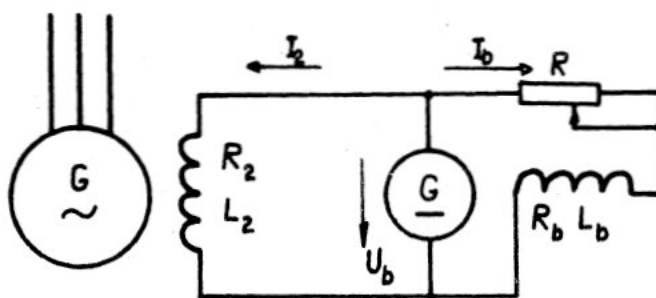
### Elektromagnetické buzení alternátoru

Alternátory velkých výkonů jsou buzeny elektromagnetem. Ten je tvořen tělesem rotoru a budícím vinutím, napájeným z budiče stejnosměrným proudem. Velikost budícího proudu ovlivňuje množství vyrobené jalové energie a tím i účinník stroje (výkon budiče je zhruba 0,5% výkonu alternátoru [1]). Parametry budiče významně ovlivňují stabilitu alternátoru, a proto jsou na budiče kladeny značné nároky. Budič musí být spolehlivý, musí umožňovat rychlou změnu budícího proudu a mít vysoký strop buzení (v případě havarijního stavu sítě bývá zapotřebí alternátor skokově přibudit).

Elektromagnetické buzení může být provedeno jako přímé nebo nepřímé. U přímého buzení je rotační budič umístěn na společné hřídeli s alternátorem. Při buzení nepřímém je rotační budič poháněn vlastním motorem, případně je budič realizován statickým zdrojem. Nejčastěji se používá buzení přímé, nepřímé buzení se používá většinou jen jako záloha při poruše přímého budiče [1].

#### Derivační budič:

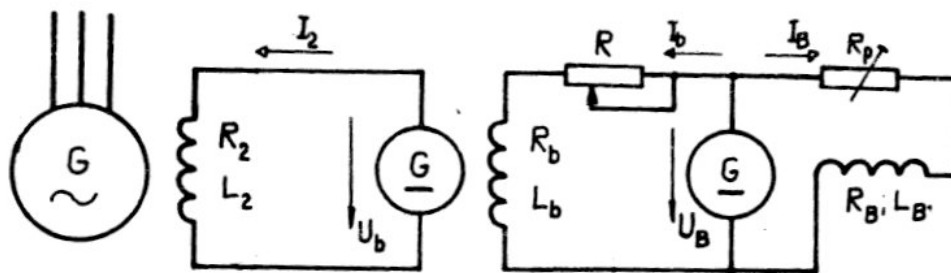
Budič je tvořen derivačním dynamem, které je umístěno na společné hřídeli s alternátorem. Tento systém se využívá pouze u alternátorů malých výkonů, jelikož není schopen zajistit plynulou regulaci napětí alternátoru při nízkých hodnotách budícího proudu [10].



Obr. 3.7: Derivační budič [10]

#### Pomocný budič:

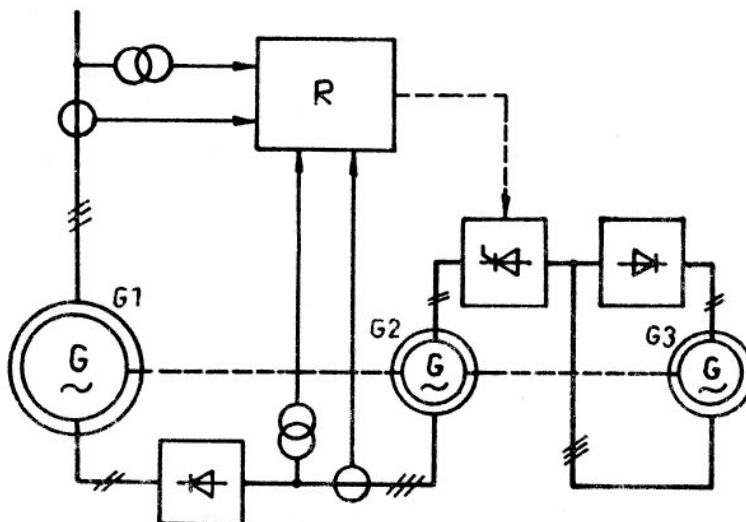
Alternátor je umístěn na společné hřídeli s hlavním a pomocným budičem. Pomocný budič nabuzuje hlavní budič, který napájí buzení alternátoru. Toto uspořádání má sice menší provozní spolehlivost, umožňuje ale plynulou regulaci v širokém rozsahu [10].



Obr. 3.8: Pomocný budič [10]

### Budiče s výkonovými diodami:

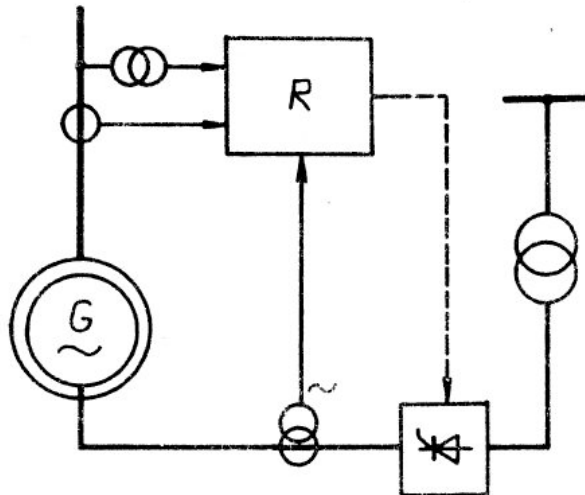
Tento systém je tvořen střídavým budičem a pomocným střídavým budičem, které jsou na společné hřídeli s alternátorem. Pomocný budič napájí přes řízený usměrňovač hlavní budič, který pomocí výkonových diod napájí buzení alternátoru. Buzení je regulováno řízeným usměrňovačem mezi pomocným a hlavním budičem. Výhodou tohoto systému je možnost použití střídavých budičů, které jsou spolehlivější (nemají komutátor) a méně náročné na údržbu.



Obr. 3.9: Budič s výkonovými diodami [10]

### Budiče s výkonovými tyristory:

Alternátor je buzen přes řízený usměrňovač z budiče, umístěného na společné hřídeli, nebo z externího zdroje. Tento systém má vynikající dynamické vlastnosti a umožňuje také rychlé odbuzení alternátoru bez použití odbuzovače. Napájení tyristorů je zajištěno buďto dalším rotačním budičem, nebo externím zdrojem.



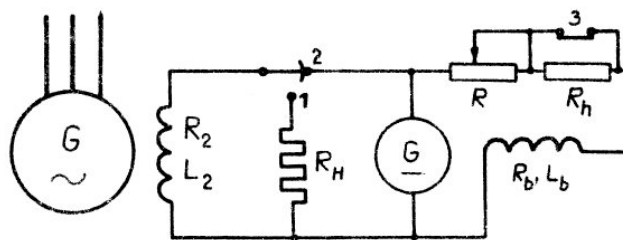
Obr. 3.10: Budič s výkonovými tyristory [10]

### Odbuzovače alternátoru

Odbuzovače se používají během havarijních stavů, při kterých nelze alternátor odpojit od místa poruchy (zkraty na svorkách a vývodech alternátoru, poruchy blokových transformátorů, vnitřní zkraty alternátoru atd.). Při těchto poruchách nelze jednoduše odpojit buzení, jelikož by se vzniklým přepětím mohla poškodit izolace budicího vinutí. Úkolem odbuzovače je co nejrychleji zmařit energii rotoru, aby se zamezilo škodám na zařízení. V některých případech může plnit funkci odbuzovače samotný budič (umožňuje-li inverzní chod). Odbuzení považujeme za ukončené, klesne-li svorkové napětí alternátoru pod 500V [10].

#### Odbuzovač s tlumícím odporem:

K budicímu vinutí alternátoru je paralelně připojen tzv. tlumící odpor, ve kterém se energie rotoru zmaří na teplo (velikost tohoto je jeden až tři násobek odporu budicího vinutí[1]). Přepínač nejprve spojí kontakty 1 a 2 nakrátko (aby se zamezilo přerušování proudu a tím vzniku přepětí v budícím vinutí) a poté se trvale přepne na kontakt č.1. Současně dochází i k odbuzení budiče pomocí odporu  $R_h$ , aby se zamezilo jeho zbytečnému namáhání. Těchto odbuzovačů se používá u alternátorů o výkonech do 100MW[3].

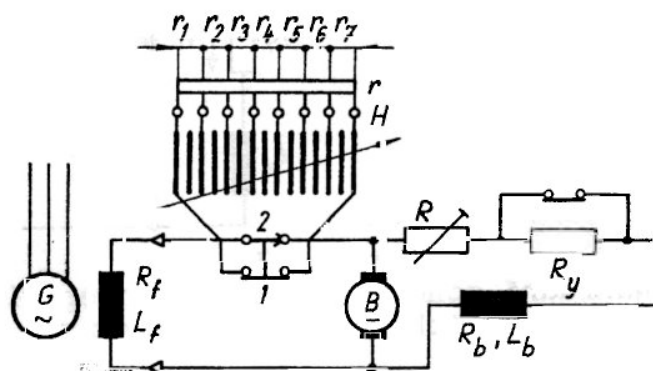


Obr. 3.11: Odbuzovač s tlumícím odporem [10]

#### Odbuzovač se zhášecí komorou:

Tento odbuzovač je tvořen zhášecí komorou, která je zapojena do série s budícím vinutím a při normálním provozu je přemostěna kontakty č. 1 a 2. Při odbuzování dojde k rozpojení kontaktů (nejdříve se rozpojí hlavní kontakty č.1, poté opalovací kontakty č.2) a mezi opalovacími kontakty začne hořet elektrický oblouk, který je následně vtažen do zhášecí komory. Energie budicího vinutí je ve zhášecí komoře zmařena na teplo. Při poklesu budicího proudu na nulu oblouk zhasne [3]. Odbuzování probíhá zhruba 4 krát rychleji než při použití odbuzovače s tlumícím odporem [1].





Obr. 3.11: Odbuzovač se zhášecí komorou [10]

### **Přepólování budiče:**

Při tomto odbuzování přepólujeme zdroj budicího napětí. Je ovšem nutné průběžně měřit svorkové napětí alternátoru, aby mohlo dojít k včasnému odpojení budiče (jinak by budícím vinutím začal protékat proud opačné polarity). Samotná realizace přepólování závisí na provedení budiče. Napájíme-li budící vinutí řízeným usměrňovačem, docílíme přepólování vhodným řízením tyristorů (invertorový chod).

## **Fázování alternátorů**

### **Synchronní:**

Tento typ fázování je nejčastější, jelikož při něm nedochází k velkým proudovým a mechanickým rázům. Časové je ovšem náročné a vyžaduje složitou automatiku. Aby došlo k úspěšnému připojení stroje k síti, je zapotřebí splnit několik podmínek. Alternátor musí mít stejný sled fází jako síť, do které jej chceme připojit. Rozdíl napětí musí být do 5% (při havarijních stavech je přípustná odchylka až 20% [10]), rozdíl fáze do 12% a rozdíl kmitočtu menší než 0,1% [3]. Proudový náraz je při rozdílu napětí jalového charakteru, při rozdílu fází má činný charakter.

### **Asynchronní:**

Využívá se zejména v havarijních situacích, při kterých kolísá napětí a kmitočet v síti. V těchto případech je totiž doba synchronního fázování neúměrně dlouhá, navíc hrozí riziko neúspěšného přifázování vlivem měnících se parametrů sítě. Odbuzený stroj se roztočí na otáčky blízké synchronním a poté se skokově přibudí. Rotor se sám vtáhne do synchronismu. Při tomto druhu synchronizace vzniká vždy proudový náraz jalového charakteru. Tento způsob synchronizace se nejlépe provádí u strojů s tlumícím vinutím.

## **Mimořádné provozní stavy alternátorů**

### **Asynchronní chod:**

K asynchronnímu chodu alternátoru dochází při ztrátě buzení stroje, kdy budící proud a magnetický tok rotoru začne exponenciálně klesat k nule (není-li budící obvod přerušen). Alternátor přestává být "brzděn" sítí, zátěžný úhel překročí hodnotu 90° a stroj vypadne ze synchronismu. Rotor přejde do nadsynchronních otáček a stroj začne odebírat ze sítě jalovou energii, což se může projevit lokálním poklesem napětí [10]. Alternátor se v tomto režimu chová jako asynchronní generátor a do rotoru se indukují proudy o skluzovém kmitočtu (u turboalternátorů je skluz v rozmezí 0,2 – 0,7%, u hydroalternátorů 3 – 5% [1]). Stroj je stále schopen dodávat činný výkon do sítě, vznikají ovšem

lokální oteplení v tělese rotoru. V případě přerušení budícího obvodu navíc vznikají v budícím vinutí nebezpečná přepětí. Rovněž vzroste statorový proud vlivem magnetizačního proudu, který roste se zvyšujícím se zkratovým číslem stroje [1]. Turboalternátory lze proto provozovat trvale v tomto stavu pouze při výkonu 30%, nebo při polovičním výkonu po dobu deseti minut. U hydroalternátorů se asynchronní chod nedoporučuje [10].

### Nesymetrické zatížení:

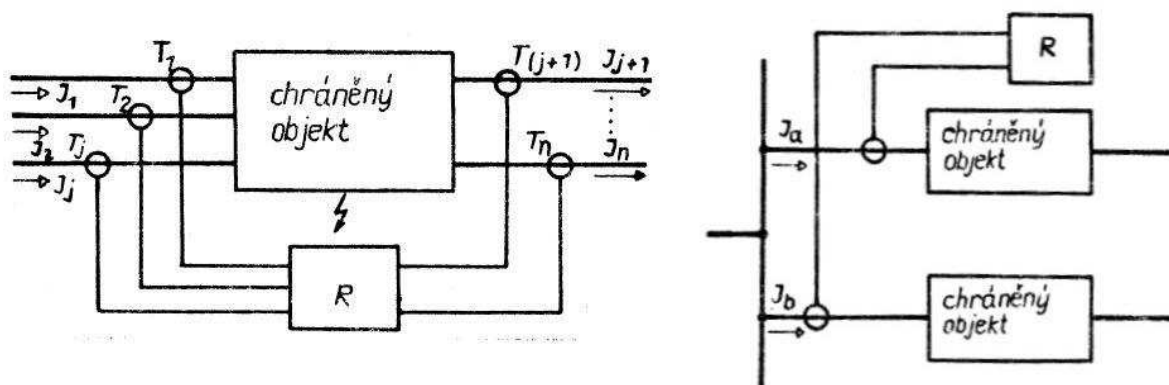
Při nesymetrickém zatížení vzniká zpětná složka proudu o dvojnásobné frekvenci sítě. Zpětná složka indukuje do tělesa rotoru proudy, které způsobují jeho lokální zahřívání. Tyto proudy navíc vytváří elektromagnetické síly, které zvyšují vibrace při provozu. Z těchto důvodů nesmí být rozdíl proudů v jednotlivých fázích u turboalternátorů větší než 10%, u hydroalternátorů 20% [1].

### Ochrany alternátorů

Jelikož je alternátor velmi drahé zařízení, je zapotřebí jej patřičně chránit proti poruchám a mimořádným provozním stavům a zamezit tak jeho poškození či zkrácení životnosti. Alternátor je také třeba odpojit, pokud jeho chod narušuje stabilitu elektrizační soustavy. Proto je alternátor vybaven systémem ochran.

### Rozdílová ochrana:

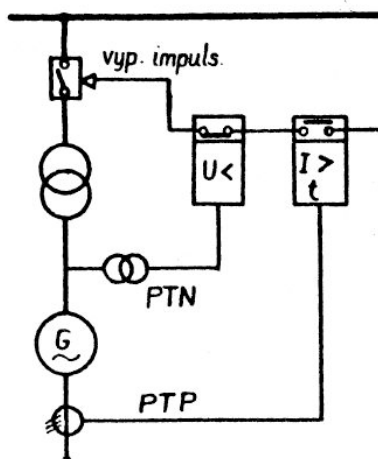
Jedná se o ochranu s vynikající selektivitou, která najde uplatnění hlavně při detekci vnitřních zkratů. Tyto ochrany dále dělíme na podélné a příčné. Podélná ochrana porovnává vstup a výstup objektu, příčná ochrana porovnává vstupy (případně výstupy) dvou totožných objektů. Pokud rozdíl měřených veličin překročí nastavenou hodnotu, dojde k vybavení ochrany. Příčné ochrany se používají jako ochrany paralelních větví statorového vinutí, podélné u blokových transformátorů a transformátorů vlastní spotřeby.



Obr. 3.12: Rozdílová ochrana [10]

### Nadproudivá zkratová ochrana:

Tato ochrana chrání alternátor před zkratem a zároveň funguje jako záloha rozdílové ochrany. Bývá doplněna podpětíovým článkem, aby se zamezilo falešnému spínání ochrany [10]. Při zkratu sepne nadproudivý článek a spustí se časový strojek (kvůli zajištění selektivity). Po uplynutí nastavené doby dojde k vybavení ochrany.



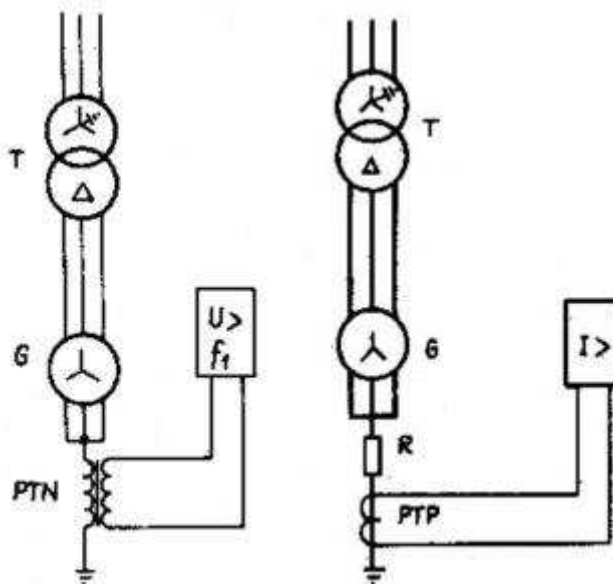
Obr. 3.13: Nadproudová zkratová ochrana [10]

#### **Impedanční (distanční) ochrana:**

Tato ochrana měří impedanci zkratové smyčky a chrání tak alternátor před zkratem. Na rozdíl od nadproudové zkratové ochrany má lepší selektivitu, jelikož její působení nezávisí na velikosti zkratového proudu a může tak pracovat bez časového zpoždění [1].

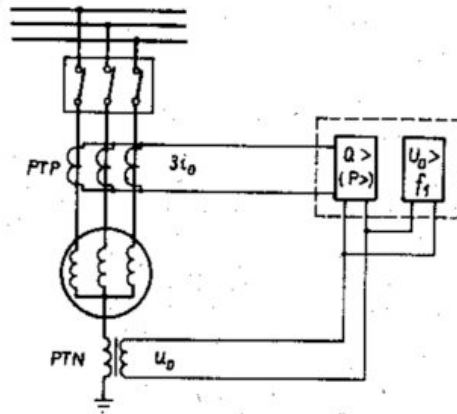
#### **Zemní ochrana statoru alternátoru:**

Chrání stator alternátoru před zemním spojením. Zemní spojení musí být včas detekováno, aby se zamezilo poškození stroje zemním proudem (dochází také k jeho nesymetrickému zatížení [1]). Zapojení ochrany se liší podle způsobu připojení alternátoru v síti. Pokud pracuje alternátor v jednom bloku s transformátorem, ochrana vyhodnocuje napětí mezi uzlem stroje a zemí, případně proud tekoucí z uzlu do země. Takto lze detekovat zemní spojení v rozsahu 95% vinutí [1,10].



Obr. 3.14: Zemní ochrana statoru při blokovém uspořádání [1]

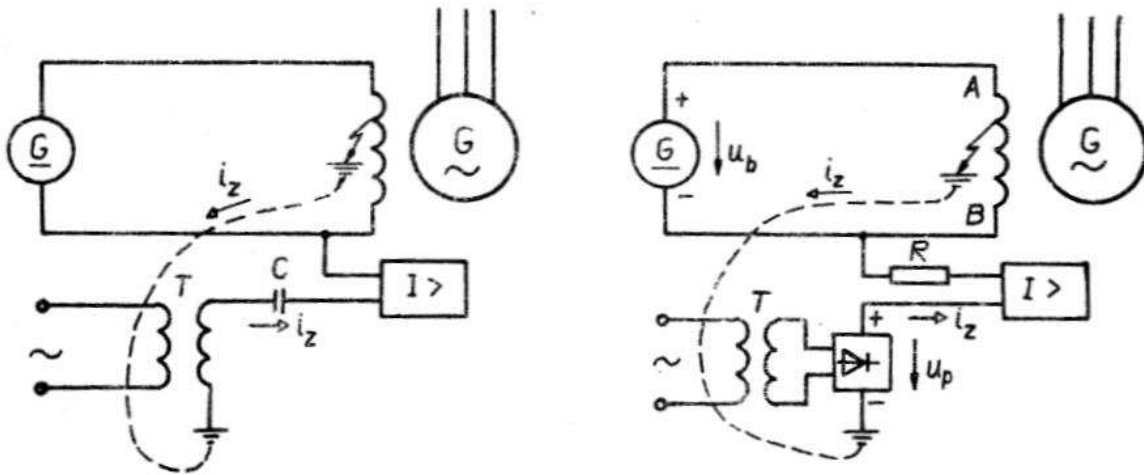
Pracuje-li alternátor do přípojnic, je nejprve nutné provést výpočty zemních kapacitních proudů alternátoru a sítě. V takovémto případě je ochrana vybavena jalovým článkem, který určuje směr toku kapacitního proudu a tím dokáže určit, zda-li došlo k zemnímu spojení v síti, nebo v alternátoru [10].



Obr. 3.15: Zemní ochrana statoru, alternátor pracuje do přípojnic [1]

### Zemní ochrana rotoru alternátoru:

K zemnímu spojení rotoru alternátoru dochází při poškození izolace budícího vinutí a jeho spojení s tělesem rotoru. Pokud dojde ke spojení pouze v jednom místě (tzv. jednoduché spojení), je stroj stále možno provozovat. Dojde-li ovšem ke druhému spojení, vznikne zkrat části budícího obvodu a může dojít k těžké havárii alternátoru. Tato ochrana alternátor neodstavuje, pouze signalizuje vznik spojení. K indikaci zemního spojení se používá metod střídavé a stejnosměrné superpozice. V obou případech ochrana obsahuje proudový článek zaznamenávající nárůst proudu, ke kterému dojde při zemním spojení.



Obr. 3.16: Zemní ochrana rotoru [10]

### Ochrana proti proudovému přetížení:

Chrání alternátor před nadměrným oteplením, které by způsobilo urychlené stárnutí izolace. Používají se časově zpožděné nezávislé proudové ochrany [1].

### Ochrana proti nadpětí:

Chrání alternátor při náhlém odlehčení zátěže, selhání regulátoru napětí a při protočení turbíny [10]. Napětí je měřeno pomocí měřícího transformátoru a ochrana průběžně vyhodnocuje jeho velikost.

### Ochrana proti zpětnému toku výkonu:

Tato ochrana odpojí alternátor v případě, kdy dojde k toku ze sítě do stroje (alternátor přejde na motorický chod). Ochrana je časově zpožděná, aby se zamezilo jejímu vybavení při kolísání výkonu [1].

#### ***Ochrana proti nesymetrii:***

Pomocí měřících transformátorů proudu v každé fázi průběžně vyhodnocuje zpětnou složku proudu a odpojí alternátor, pokud by došlo k jeho nedovolenému oteplení.

#### ***Ochrana proti ztrátě buzení:***

Tato ochrana zajišťuje snížení výkonu soustrojí při ztrátě buzení a jeho přechodu do asynchronního chodu. Po nastavené době (pokud buzení není obnoveno) alternátor odpojí.

#### ***Ochrana proti podsynchronním otáčkám:***

Blokuje regulátor napětí stroje do doby, než dosáhne jmenovitých otáček. Tím zamezuje nárůstu budícího proudu stroje a zabraňuje tak přesycení magnetických obvodů.

#### ***Ochrana proti ložiskovým proudům:***

Jelikož není magnetické pole alternátoru dokonale souměrné, dochází při jeho provozu ke vzniku napětí mezi hřídelí rotoru a statorem stroje. Aby se zamezilo toku proudu přes ložiska, jsou ložiskové pánve izolovány. Tato ochrana tedy kontroluje izolaci ložiskových pánví. Je tvořena měřícím transformátorem proudu, jehož středem prochází hřídel rotoru alternátoru. Pokud dojde k toku proudu přes ložiska, ochrana vybaví.

#### ***Ochrana proti samobuzení:***

K samobuzení stroje může dojít, pracuje-li alternátor do kapacitní zátěže (např. dlouhé vedení naprázdno). Samobuzení se projeví vzrůstem svorkového napětí stroje. Tato ochrana je tvořena přepětíovým článkem, který je blokován minimálním proudem buzení [10].

## **3.2 Transformátory**

V každé elektrárně je použito několik druhů transformátorů, které se liší svým účelem a tím i vlastním provedením. Pomocí transformátorů se vyvádí výkon alternátorů do sítě, pokrývá se jimi vlastní spotřeba a transformují napětí pro vlastní spotřebu na patřičné napěťové hladiny.

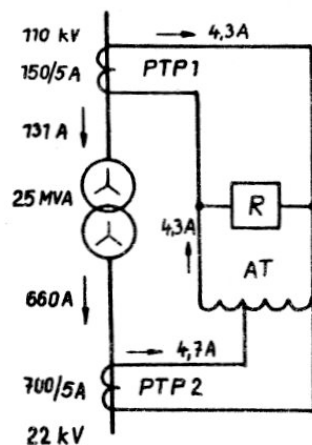
### **Ochrany transformátorů**

Transformátory je třeba stejně jako ostatní zařízení chránit před poruchovými stavy. Poruchy transformátorů můžeme dělit na průchozí (nastávají vlivem připojené zátěže) a vnitřní (poruchy transformátoru samotného) [10]. Při poruše se může transformátor začít nebezpečně zahřívat, což vede ke zkrácení životnosti nebo až k destrukci některých jeho částí. Nebezpečné jsou také výboje uvnitř samotného transformátoru, případně silové projevy poruchových proudů. Proto transformátory vybavujeme systémem ochran, které jej v případě překročení nastavených parametrů odpojí a zamezí tak jeho poškození.

#### ***Rozdílová ochrana:***

Chrání transformátor před vnitřními poruchami. Realizace této ochrany je složitější než u jiných objektů, jelikož vstupem a výstupem transformátoru tečou rozdílné proudy. Využívá se proto

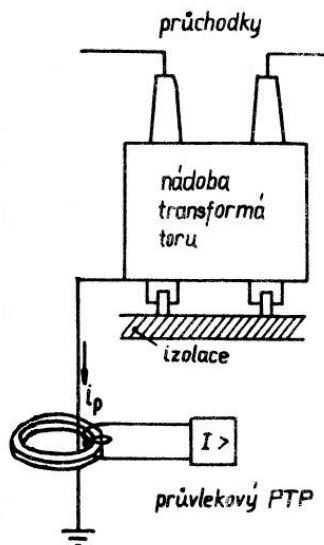
měřících transformátorů proudu s různými převodovými poměry. Je také třeba uvažovat fázové posuvy mezi proudy a náraz magnetizačního proudu při zapnutí transformátoru. Proto se do obvodů vkládají pomocné transformátory, případně se snižuje citlivost rozdílových relé.



Obr. 3.17: Rozdílová ochrana transformátoru [10]

#### Nádobová ochrana:

Tato ochrana vybavuje při přeskočení napětí na průchodkách transformátoru, nebo při spojení vinutí s jeho kotrrou. Transformátor je umístěn izolovaně od země, zemnicí vodič prochází proudový transformátorem. Dojde – li k výskytu napětí na kostře transformátoru, začne zemnicím vodičem protékat proud a ochrana vybaví.



Obr. 3.18: Nádobová ochrana transformátoru [10]

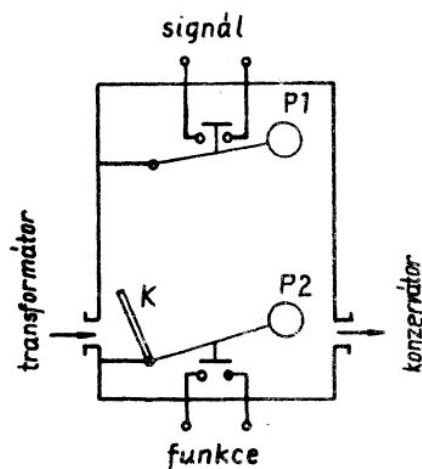
#### Nadproudová ochrana:

Používají se stejné prostředky jako u chránění jiných objektů. Běžná je trojfázová, časově zpožděná nadproudová ochrana. Pokud je zapotřebí ochranu znečitlivět vůči vzdáleným zkratům, využijeme podpětového blokování.

#### Plynové relé:

Tato ochrana nalezne své uplatnění u transformátorů s olejovým chlazením. Průvodním jevem některých poruch transformátoru je totiž výron plynu z chladicího oleje. Ochrana je umístěna mezi víkem transformátoru a konzervátorem a je vybavena dvěma plováky. Plovák P1 reaguje na pomalé

vyvíjení plynů (např. při přetížení), plovák P2 reaguje na pokles hladiny oleje (např. při zkratech, netěsnosti nádoby apod.). Plovák P2 může být vybaven klapkou, která urychluje funkci ochrany při zkratech (olej začne proudit z nádoby do konzervátoru). Při sepnutí plováku P1 dojde pouze k signalizaci poruchy, plovák P2 způsobí okamžité vybavení ochrany [1].



Obr. 3.19: Plynové relé [10]

### Hlavní transformátory

Hlavní transformátory slouží k vyvedení výkonu elektrárny, pokud alternátor nepracuje přímo do sítě. Transformují napětí alternátoru na napěťovou hladinu vhodnou pro přenos, mohou být také vybaveny odbočkou pro napájení vlastní spotřeby elektrárny (pokud není vlastní spotřeba kryta odbočkou ze svorek alternátoru). U jednotek velkých výkonů bývá použito dvou paralelních transformátorů, je také možný chod několika alternátorů do jednoho transformátoru. V případě blokového provedení elektrárny hovoříme o tzv. blokových transformátorech.

Výkon transformátoru je určen výkonem alternátoru, ke kterému je připojen (je ovšem třeba počítat s možným krátkodobým přetížením). Pokud je vlastní spotřeba elektrárny (případně bloku) pokryta ze svorek alternátoru, volí se výkon nižší o vlastní spotřebu. Transformátor je buďto třífázový, nebo je tvořen třemi jednofázovými jednotkami. Použití jednofázových transformátorů má své výhody – jsou jednodušší na výrobu a přepravu, levněji se také realizuje případná záloha (jako záložní stačí pouze jeden jednofázový transformátor na celou elektrárnu, kterým se v případě poruchy nahradí postižená jednotka). Nevýhodou je ovšem vyšší cena. Chlazení je olejové, přičemž může být umístěno mimo samotný transformátor. Cirkulace oleje je přirozená, nebo nucená [3].

Primární vinutí bývá téměř vždy zapojeno do trojúhelníka, jelikož tak lze celkem snadno snížit obsah třetí harmonické a zároveň lépe rozložit zatížení na jednotlivé fáze (zejména při nesouměrných zkratech [10]). Rovněž i proudy jsou při zapojení do trojúhelníka nižší, což umožňuje použít vodiče menšího průřezu. Pokud se počítá s pokrytím vlastní spotřeby při rozběhu bloku z tohoto transformátoru, je mezi primárem a alternátorem zapojen alternátorový vypínač. Je – li vlastní spotřeba při rozběhu bloku kryta z jiného transformátoru, je alternátor připojen přímo na transformátor a vypínač se nachází až na jeho sekundární straně.

Sekundární vinutí je zapojeno do hvězdy, uzemnění uzlu může být připojeno přes odpojovač z důvodu různých zkoušek a měření. Napětí nakrátko je závislé na samotné konstrukci transformátoru a běžně bývá do 15% [10]. Sekundár může být vybaven odbočkami, kterými lze upravit převodový poměr (případně je proveden jako autotransformátor), zejména pokud je připojen současně na více napěťových hladin [10].

## **Odbočkové transformátory**

Tyto transformátory zajišťují vlastní spotřebu elektrárny. Mohou být napájeny přímo z alternátoru, nebo z vnější sítě. V některých případech musí pokrývat spotřebu elektrárny také při jejím rozběhu. Většinou bývají zálohovány. Sekundární vinutí těchto transformátorů může být zdvojeno kvůli omezení zkratových proudů [3]. Izolace vinutí je většinou litá z důvodů větší spolehlivosti a nevybušnosti, zejména u starších zařízení se ale lze setkat s transformátory s olejovým chlazením.

### **3.3 Vlastní spotřeba elektrárny**

Vlastní spotřebu elektrárny lze zajistit několika způsoby, které se od sebe liší jak spolehlivostí, tak investičními náklady. Provedení zajištění vlastní spotřeby elektrárny je také závislé na jejím hlavním elektrickém schématu. Zvláštní skupinou jsou pak elektrárny jaderné, ve kterých je zapotřebí zajistit napájení určitých částí za každých okolností, aby se zamezilo poškození zařízení nebo jaderné havárii.

Přepínání mezi jednotlivými zdroji se provádí buďto jejich krátkodobým paralelním spojením, nebo prostým přepnutím (v tom případě dojde ale ke krátkodobému výpadku napájení) [10].

#### **Pracovní zdroje**

Pracovní zdroj kryje dodávku pro vlastní spotřebu při normálním provozu. V tomto stavu můžeme vlastní spotřebu pokrýt z různých zdrojů.

##### ***Napojení na vnější síť:***

Historicky zřejmě nejstarší provedení. Vlastní spotřeba elektrárny je plně kryta z vnější sítě. Investiční náklady jsou nízké, při výpadku vnější sítě je však znemožněn provoz elektrárny.

##### ***Pomocný alternátor:***

V tomto případě je vlastní spotřeba elektrárny kryta samostatným alternátorem, který je umístěn na společné hřídeli s hlavním alternátorem, nebo je poháněn samostatnou turbínou. Toto řešení se vyznačuje velkou spolehlivostí, je však investičně a provozně nákladné.

##### ***Napojení na hlavní alternátor:***

Jedná se o nejčastější řešení zejména u elektráren v blokovém provedení. Vlastní spotřeba je kryta odbočkou z hlavního alternátoru. Je – li napětí alternátoru shodné s napětím sítě vlastní spotřeby, je spojení přímé, případně přes reaktor. Jsou - li napětí odlišná, je do odbočky vložen transformátor. Výhodou je poměrně vysoká spolehlivost vzhledem k investičním a provozním nákladům.

#### **Záložní zdroje**

Záložní zdroj kryje dodávku pro vlastní spotřebu v případě výpadku pracovního zdroje. Jako záložní zdroj se zpravidla volí síťová rozvodna. V případě výpadku dojde k samočinnému přepnutí a napájení převezme automaticky záložní zdroj.

Jaderné elektrárny jsou z důvodu bezpečnosti napájeny z více stran, v případě úplného výpadku vnějšího napájení plní funkci záložních zdrojů dieslové generátory a akumulátorové baterie.

#### **Najížděcí a doběhové zdroje**

Tyto zdroje pokrývají vlastní spotřebu elektrárny při uvádění výroby do chodu a při jejím odstavení. Stejně jako v předchozím případě plní většinou tuto funkci síťová rozvodna, u jaderných elektráren se doběhové zdroje zálohují zdroji záložními (z důvodu bezpečného dochlazení aktivní zóny reaktoru).



## 4. Současné trendy

Současné trendy v elektrárénství směřují ke zvyšování účinnosti a spolehlivosti zdrojů. Elektrická část elektrárny má (na rozdíl od té neelektrické) vysokou účinnost, která už prakticky dosáhla svých mezí. Další zvyšování účinnosti je tedy závislé zejména na výzkumech nových materiálů pro konstrukci magnetických obvodů alternátorů a transformátorů a také na vývoji supravodivých materiálů.

Spolehlivost zdrojů se zvyšuje zaváděním nových bezdemontážních diagnostických metod, které dokážou detekovat vznikající poruchu dříve, než dojde k jejímu vlivu na chod stroje, nebo případné havárii. To umožňuje lépe využít doby odstávky k údržbě stroje a celkově zlepšuje využití instalovaného výkonu, čímž se zkrátí doba návratnosti investice do jeho stavby.

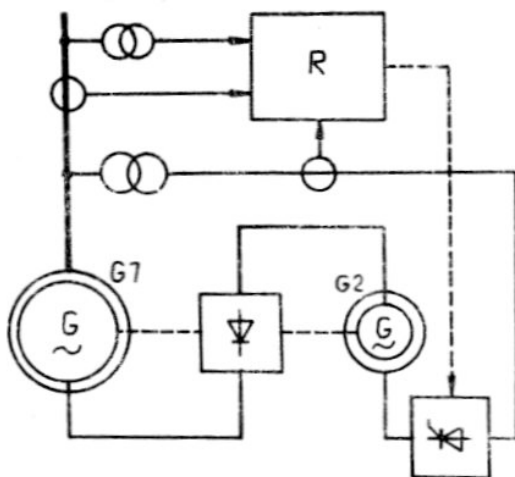
### **4.1 Parní a jaderné elektrárny**

#### **Bezkontaktní buzení alternátorů**

Přenos elektrické energie mezi rotujícími a stojícími částmi soustrojí je nejčastěji realizován kluznými kontakty. Kluzný kontakt je tvořen uhlíkovým blokem (tzv. kartáč), který dosedá na kroužek či komutátor, umístěný na hřídeli soustrojí. Při provozu dochází k opotřebení jak uhlíku, tak kroužku či komutátoru a je proto nutné kluzné kontakty průběžně kontrolovat. Navíc může docházet k jejich jiskření (odskokem uhlíku, přeskoky mezi lamelami komutátoru), které je zdrojem VF rušení a snižuje jeho životnost. Jelikož se jedná o velmi poruchovou část, můžeme zvýšit spolehlivost soustrojí tzv. bezkontaktním buzením.

#### **Bezkartáčové budiče s výkonovými diodami:**

Budící soustava je tvořena střídavým budičem v tzv. inverzním provedení (pracovní vinutí je na rotoru), umístěném na společné hřídeli s alternátorem. Usměrnění budícího proudu je realizováno diodami, umístěnými na hřídeli soustrojí. Tento systém se používá u strojů malých výkonů, jelikož má špatnou dynamiku a pomalé odbuzení [10].

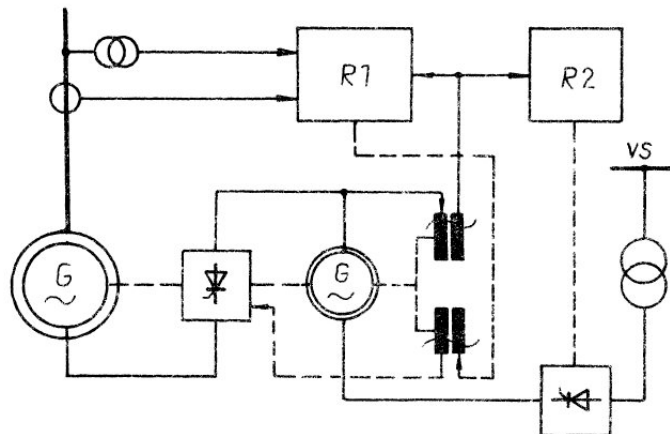


Obr. 4.1:Bezkartáčový budič s výkonovými diodami [10]

#### **Bezkartáčové budiče s výkonovými tyristory:**

Budící soustava je tvořena střídavým budičem, umístěným na společné hřídeli s alternátorem. Budič napájí budící vinutí alternátoru pomocí tyristorů, umístěného na hřídeli soustrojí. Jednotlivé gate tyristorů jsou napájeny pomocí speciálního rotačního převodníku. Napájení statoru budiče je také realizováno pomocí řízeného usměrňovače s tyristory. Tento systém má vynikající dynamické

vlastnosti a velmi rychlé odbuzení [10]. Vzhledem k vysoké ceně se však uplatňují pouze u alternátorů velkých výkonů.



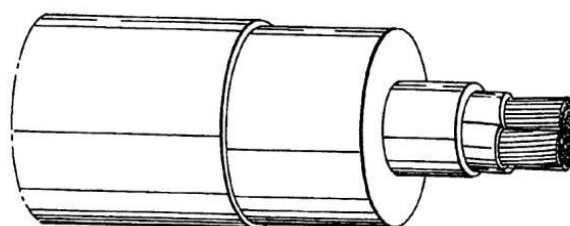
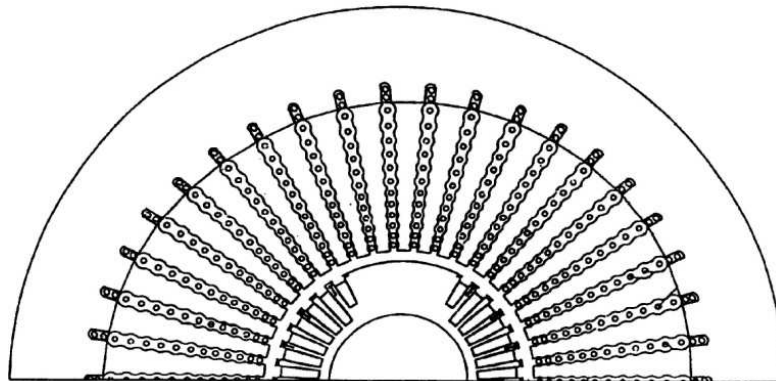
Obr. 4.2:Bezkartáčový budič s výkonovými tyristory [10]

### Powerformer

Jedná se o vysokonapěťový generátor vyvinutý firmou ABB, který hned v několika ohledech předčí alternátory klasické konstrukce. Má vyšší účinnost a na rozdíl od běžných alternátorů je vinutí tohoto stroje tvořeno vysokonapěťovými kabely. To zvyšuje spolehlivost stroje a umožňuje jeho provoz až do napětí 400kV [15]. Tím odpadá nutnost použití blokového transformátoru, který je investičně velmi nákladný, zvyšuje poruchovost bloku a snižuje jeho účinnost.

Statorové vinutí stroje je tvořeno speciálními vysokonapěťovými kabely, které jsou izolovány polyetylénem. Izolace je kroková (s rostoucím počtem závitů se zesiluje) a je z obou stran doplněna o polovodivou vrstvu, přičemž ta vnější je přímo spojena se zemním potenciálem. Kabel má koaxiální uspořádání, díky němuž je jeho elektrické pole více homogenní než u vodičů obdélníkových průřezů.

První generátor tohoto typu byl instalován roku 1998 ve švédské vodní elektrárně Porjus [15].



Obr. 4.3: Powerformer a jeho statorový vodič [13]

## Zapouzdřené rozvodny

Na rozdíl od běžných rozvodů vysokého napětí, kde je jako izolantu používán vzduch, plní v zapouzdřených rozvodnách funkci izolantu hexafluorid síry  $\text{SF}_6$ . Tento plyn se vyznačuje velkou elektrickou pevností, která roste s jeho tlakem.

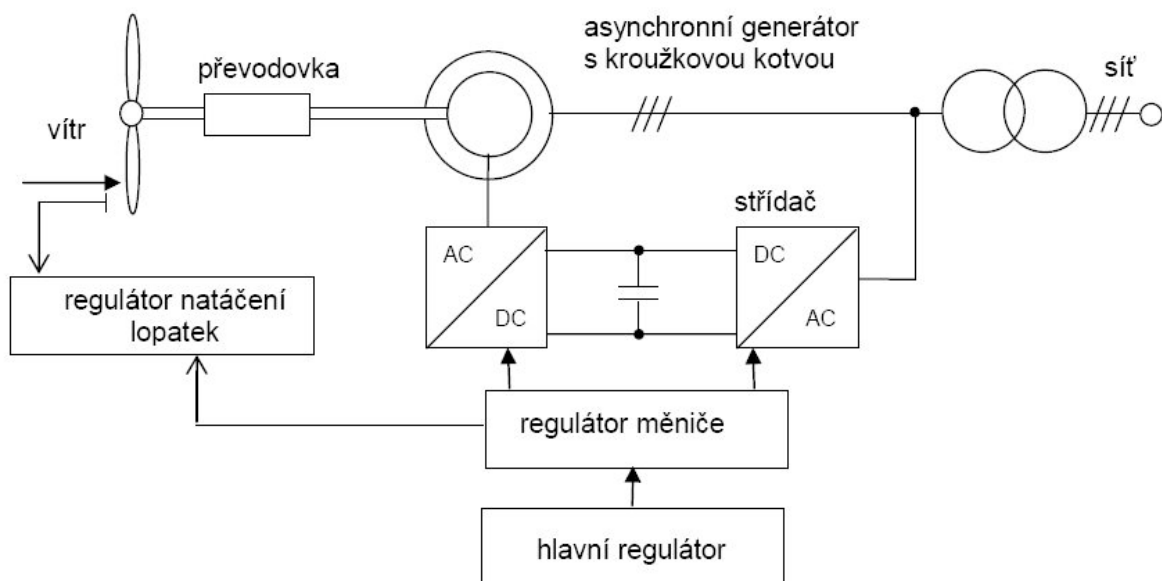
Jednotlivé prvky rozvodny jsou zapouzdřeny ve speciálních komorách, které jsou naplněny tímto plynem. Komory jsou mezi sebou vzájemně utěsněny a jsou vybaveny čidly pro měření tlaku a teploty plynu. Systém zapouzdřených přípojníc může být jednofázový (každá fáze má svou vlastní komoru), nebo třífázový (všechny tři fáze jsou ve společné komoře). Rozvodny jsou stavebnicové konstrukce, což usnadňuje jejich montáž.

I když jsou tyto rozvodny investičně nákladné, má jejich použití celou řadu výhod. Jejich provozní spolehlivost je vysoká – atmosférické podmínky nemají na jejich provoz žádný vliv, zapouzdření také zamezuje případným zkratům a zemním spojením. Navíc jsou tyto rozvodny prakticky bezúdržbové. Jelikož jsou pouzdra uzemněna, je minimalizována možnost úrazu elektrickým proudem. Další velkou výhodou je jejich prostorová nenáročnost, která umožňuje umístění rozvodny přímo do budovy technologie.

## 4.2 Větrné elektrárny

Většina elektráren na našem území je vybavena asynchronním generátorem. Pro co nejlepší využití energie větru se dnes využívají asynchronní generátory s možností přepínání statorového vinutí. Přepínáním lze změnit jak počet pólů generátoru v závislosti na jeho otáčkách, tak i zapojení Y/D pro omezení proudových rázů, které mohou nepříznivě ovlivňovat síť.

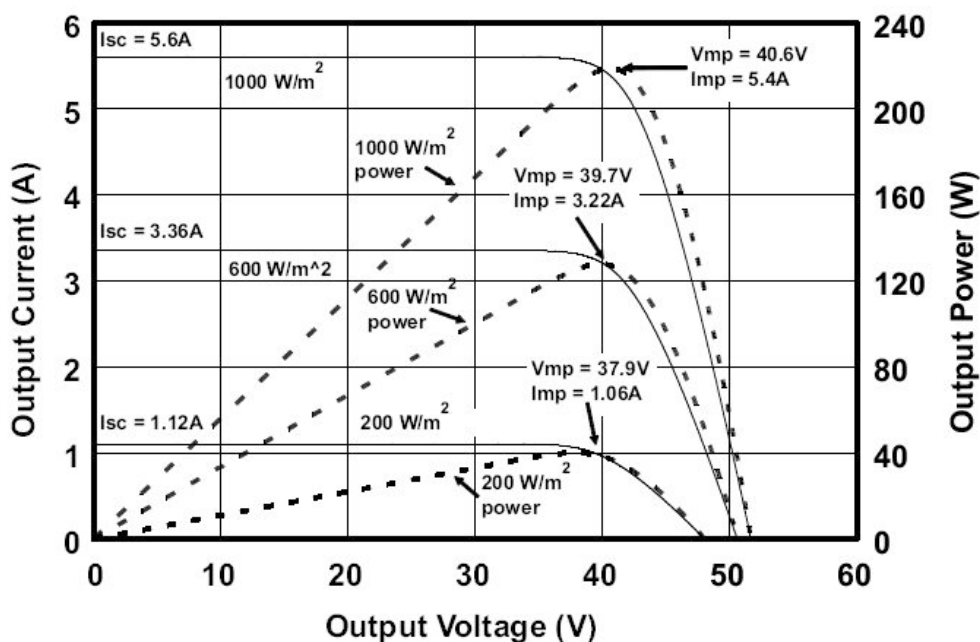
Ještě lepších výsledků dosáhneme, pokud použijeme generátor s vinutou kotvou. Vinutá kotva umožňuje měnit mechanickou charakteristiku generátoru tak, aby byla účinnost zdroje co možná nejvyšší v jakémkoli bodu jeho charakteristiky. V tomto případě je rotor kotvy napájen pomocí AC-AC měniče, který je řízen hlavním regulátorem. Regulátor neustále vyhodnocuje rychlost větru a otáčky rotoru a upravuje napájení rotorového vinutí tak, aby došlo k maximálnímu využití větrné energie. Zároveň řídicí systém zaručuje, že bude připojení generátoru k síti doprovázeno co možná nejmenším proudovým a napěťovým rázem.



Obr. 4.4: Zapojení asynchronního generátoru s kroužkovou kotvou[17]

## 4.2 Fotovoltaické elektrárny

Pro zajištění co nejvyšší účinnosti fotovoltaické elektrárny je žádoucí, aby byl pracovní bod zátěže umístěn na zlom V-A charakteristiky fotovoltaického článku. V tomto bodě (v cizojazyčné literatuře označován jako maximum power point - MPP) je totiž k dispozici nejvyšší výkon a tím i účinnost.



Obr. 4.5: V-A charakteristika s vyznačenými průběhy výkonů [18]

V praxi je samozřejmě většinou pracovní bod zátěže mimo MPP. Mezi panel a zátěž proto zařazujeme DC-DC měnič, řízený mikroprocesorem. Ten upravuje napětí pro zátěž tak, aby byl pracovní bod panelu v MPP – zjednodušeně lze říci, že výkonově přizpůsobuje zátěž a panel. K nalezení bodu MPP se používá speciálních algoritmů za tímto účelem vyvinutých.

## Závěr

Výzkum v oblasti vodivých a magnetických materiálů přináší neustále nové objevy. To umožňuje navrhovat elektrické stroje nových konstrukcí či zdokonalování konstrukcí strojů stávajících. Je třeba ale brát vždy v potaz ekonomickou stránku věci, takže i když jsou v laboratořích funkční prototypy nových generátorů, jejich uvádění do skutečného provozu je závislé především na ceně a zvládnutí technologie výroby.

Vinutí alternátorů budou v budoucnu nejspíše provedena supravodivými vodiči. Tím se výrazně omezí joulovy ztráty a zvýší se tak účinnost stroje. Rotory alternátorů budou provedeny bez drážek, čímž se zlepší využití magnetického obvodu rotoru (nebude docházet k přesycování zubů) a zároveň se tak zjednoduší návrh stroje.

S pokrokem na poli vysokoteplotních reaktorů a jaderné fúze se také začíná uvažovat o použití magnetohydrodynamických generátorů v energetice. Tento generátor pracuje na principu hallova, případně faradayova jevu a neobsahuje žádné pohyblivé části. Je tvořen dvěma elektrodami, mezi kterými proudí vodivé médium (kapalina, plyn nebo plazma). Elektrody a jejich okolí jsou umístěny v homogenním magnetickém poli a průchodem média na nich vzniká napětí. Uvažuje se také o využití těchto generátorů při zvyšování účinnosti konvenčních elektráren.

## Použitá literatura

- [1] BRAUNER Jiří, ŠINDLER Zdeněk: Elektrická část elektráren, VŠB-TU Ostrava 1987
- [2] DVORSKÝ Emil, HEJTMÁNKOVÁ Pavla: Elektrárny, Západočeská univerzita 1997, ISBN: 80-7082-523-5
- [3] DOČEKAL Antonín, BOUČEK Stanislav: Elektrárny II, ČVUT Praha 1995
- [4] MATOUŠEK Antonín: Ekologie v elektroenergetice, VUT Brno 2000
- [5] KEPÁK František: Energetika a životní prostředí, Universita J.E. Purkyně, Ústí nad Labem 1999
- [6] SRDEČNÝ Karel: Fotovoltaika v budovách, EkoWATT 2009, ISBN: 978-80-87333-04-4
- [7] GRÓFOVÁ Jitka: Studium vybraných aspektů fotovoltaického systému, Diplomová práce MU Praha 2009
- [8] KLEIN Zdeněk: Větrné elektrárny od A do Z, Diplomová práce MU Praha 2009
- [9] SCHULZ Heinz: Savoniův rotor, HEL 2005, ISBN: 80-86167-26-7
- [10] ONDRÁŠEK Milan: Elektrárny II, VUT Brno
- [11] BERAN Miloš: Elektrická zařízení tepelných elektráren, VŠSE Praha 1988
- [12] MĚŘIČKA Jiří, HAMATA Václav, VOŽENÍLEK Petr: Elektrické stroje, ČVUT 2000, ISBN: 80-01-02109-2
- [13] <http://www.freepatentsonline.com/6919664.html>
- [14] BENDA Břetislav: Výzkum parametrů tlumícího vinutí synchronního alternátoru, Elektrotechnický obzor 10/1960
- [15] KOLCUN Michal a kol.: Elektrárne, Technická univerzita v Košiciach 2006, ISBN: 80-8073-704-5
- [16] [http://www.eru.cz/user\\_data/files/statistika\\_elektro/rocni\\_zprava/2010/vykon/3.htm](http://www.eru.cz/user_data/files/statistika_elektro/rocni_zprava/2010/vykon/3.htm)
- [17] MIŠÁK Stanislav, KREJČÍ Petr, PROKOP Lukáš, SIKORA Tadeusz: Větrné elektrárny s asynchronními generátory v sítích VN, Elektrověda 2008/47, ISSN: 1213-1539
- [18] Introduction to maximum power point tracking ([www.ti.com/lit/an/slva446/slva446.pdf](http://www.ti.com/lit/an/slva446/slva446.pdf))
- [19] [http://nadrevo.blogspot.com/2009\\_11\\_08\\_archive.html](http://nadrevo.blogspot.com/2009_11_08_archive.html)